

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Frage 3

Neue Verfahren für die Ausnutzung der Wasserkraft an Wasserstraßen. Ihre Rückwirkungen auf die Schifffahrt, auf den Entwurf und den Bau der wasserbaulichen Anlagen, insbesondere der beweglichen Wehre.

Von Prof. Dr. Ing. Heinrich Wittmann, Technische Hochschule Karlsruhe,

Direktor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Heinz Fuchs, Vorstandsmitglied der Rhein-Main-Donau-A.G. München.

Zusammenfassung:

I. Für das Donaukraftwerk Jochenstein wurden an einem wasserbaulichen Modell die Einflüsse des Turbinenschnellschlusses auf die Schifffahrt untersucht. Im Schleusenbereich sind dabei weniger die absoluten Höhen, als die Neigungen der Schwallwellen maßgebend. Da ohne Gegenmaßnahmen die bei Vollabschluß auf ein Schiff wirkenden Kräfte untragbar für die Schifffahrt waren, wurden zahlreiche hydraulische Entlastungsmöglichkeiten untersucht, als deren zweckmäßigstes Ergebnis eine Vergrößerung der Leerlaufwassermenge von 8 und 30% erscheint. Ferner empfiehlt es sich, den Turbinenschließvorgang von 7 auf 10 sec zu verändern (Schwallsteuerung) und gleichzeitig die Wehrverschlüsse mit der kleinstmöglichen Verzögerung abzusenken.

Durch Untersuchungen der Fa. Voith, Heidenheim, wurden die Druckschwankungen im Saugrohrkrümmer bei Abschaltung auf eine vergrößerte Leerlaufwassermenge ermittelt. Wird gleichzeitig eine Drehzahlvermehrung um 30% zugelassen, dann wachsen die Druckschwankungen recht erheblich an. Obwohl bei einer ausreichenden Belüftung durch das Wasserführungsschild des Laufrades die Druckschwankungen gedämpft werden können, sollte eine länger dauernde wesentliche Drehzahlvermehrung nicht zugelassen werden. Durch Messungen im Bauwerk selbst wurde festgestellt, daß beim Leerlauf mit vergrößerter Überwassermenge und beim Abschalten auf eine vergrößerte Leerlaufwassermenge keine Schwankungen und Erschütterungen auftreten, die den Eindruck machen, daß sie das Bauwerk ungünstig beanspruchen oder gar gefährden.

Bei einem weiteren Abschaltversuch konnten die am Modell ermittelten Zusammenhänge zwischen Wasserspiegelneigung, Schiffsneigung und Trossenkraft eines in der Schleuse verhefteten Schleppkahnens bestätigt werden. Demnach folgt ein Schleppkahn fast unmittelbar der Neigung der Schwallwelle und erfährt eine Belastung von der Größe $P = G \times J$. Wird die durchhängende Trosse durch die Schiffsbewegung gestrafft, dann kann die Trossenkraft ein Vielfaches dieses Wertes erreichen.

II. Bei der Mainstaustufe Gerlachshausen-Volkach wird eine größere Leistung dadurch erreicht, daß das Kraftwerk in eine Turbine neben dem Wehr im Fluß am Beginn der Mainschleife sowie in eine Turbine bei den Schleusen am Ende des Durchstichkanales getrennt wird.

Durch Modellversuche konnte eine Lösung gefunden werden, bei der der Kraftwerksbetrieb die Schifffahrt im Durchstich und insbesondere im Bereich der Schleusen nicht behindert. Dem zwischen den beiden Schleusen gelegenen Kraftwerk wird dabei die Triebwassermenge durch zwei seitliche Einläufe und unmittelbar durch den eigentlichen Kraftwerkseinlauf zugeführt. Bei Turbinenschnellschluß entstehen im Oberwasser Schwallhöhen von etwa 10 cm. Die zusätzliche Belastung, die dadurch ein in der Schleuse liegendes Schiff erfährt, ist unbedeutend; für ein ausfahrendes Schiff erreicht die Schwallkraft einen ohne Beeinträchtigung der Schifffahrt zulässigen Wert.

An einem Kraftwerksmodell wurden bei der Fa. Voith, Heidenheim, verschiedene Entlastungsanlagen untersucht. Ein Schütz oder eine Drehklappe in der Unterwasserseite der Spiralwand werden aus turbinentechnischen Gründen abgelehnt. Die besten Ergebnisse konnten mit einer horizontalen Drehklappe über dem Turbineneinlauf erzielt werden.

Literatur:

- [1] „Schwall- und Sunkversuche für das Donaukraftwerk Jochenstein“
Unveröffentlichter Versuchsbericht des Flußbaulaboratoriums der T. H. Karlsruhe

- [2] Wittmann: "The application of new electrical Measuring devices in hydraulic experimental work"
Bericht B 5, Internationaler Kongreß für wasserbauliches Versuchswesen, Den Haag 1955
- [3] Wittmann: "Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen"
XVIII. Internationaler Schiffahrtskongreß, Rom 1953
Abt. I, Frage 1 b
- [4] „Leerlaufversuche für das Kraftwerk Jochenstein“
Unveröffentlichter Versuchsbericht der Fa. Voith, Heidenheim
- [5] Voaden: "Runaway speed of Kaplan Turbines"
Transactions of the ASME, 1952, Vol. 74, No. 6
- [6] „Schwall- und Sunkversuch am Donaukraftwerk Jochenstein am 8. Juni 1956“
Beitrag des Flußbaulaboratoriums der T. H. Karlsruhe zu einem unveröffentlichten Bericht der Donaukraftwerk Jochenstein AG.
- [7] „Vorläufiger Bericht über den Schwall- und Sunkversuch am Donaukraftwerk Jochenstein am 8. Juni 1956“. Unveröffentlichter Bericht der Donaukraftwerk Jochenstein AG.
- [8] „Abschaltversuche im Kraftwerk Jochenstein am 25. Januar 1956“
Untersuchung des Bauwerks auf die Erschütterungen und Bewegungen.
Unveröffentlichter Bericht des Material-Prüfungsamtes der T. H. München
- [9] Steinhauser: „Energieausnutzung an der Mainstrecke Würzburg—Bamberg der Großschiffahrtsstraße Rhein—Main—Donau“
Bericht 209 H/33, Fünfte Weltkraftkonferenz Wien 1956
- [10] „Modellversuche für das Kraftwerk Gerlachshausen“
Unveröffentlichter Versuchsbericht des Flußbaulaboratoriums der T. H. Karlsruhe
- [11] „Modellversuche Gerlachshausen“
Unveröffentlichter Versuchsbericht der Fa. Voith, Heidenheim

	Seite
Gliederung: Vorwort	59
I Donaukraftwerk Jochenstein	60
1. Ergebnisse von wasserbaulichen Modellversuchen des Kraftwerkes	60
(Flußbaulaboratorium der TH Karlsruhe)	
2. Versuchsergebnisse der Firma Voith, Heidenheim	65
3. Messungen in der Natur	66
4. Schlußfolgerung	72
II Mainstaustufe Gerlachshausen	72
1. Energiewirtschaftliche Grundlagen	72
2. Ergebnisse der wasserbaulichen Modellversuche	73
(Flußbaulaboratorium der TH Karlsruhe)	
3. Versuchsergebnisse der Firma Voith, Heidenheim	76
4. Bauausführung	79

Vorwort

Der ständig wachsende Bedarf an elektrischer Energie zwingt dazu, neben dem Ausbau der nichtschiffbaren Hoch- und Mittelgebirgsflüsse mehr und mehr auch Flüsse und Ströme heranzuziehen, die bisher im wesentlichen der Schifffahrt vorbehalten waren. Es beeinflussen sich in solchen Fällen Energieerzeugung und Schifffahrt, wobei die ältere Nutzung zwar zu gewährleisten, aber nicht als allein vorherrschend anzusehen ist. Die voneinander verschiedene Betriebsart der beiden Nutzungen erfordert jedoch besondere Anlagen und gegenseitige Rücksicht z. B. derart, daß die größten Füll- und Entleerungswassermengen der Schleusen so begrenzt werden, daß das Kraftwerk bei dem gegebenen Wasserdargebot noch wirkungsvoll betrieben werden kann. Andererseits braucht der Schifffahrtsverkehr, um reibungslos abzulaufen, an den Schleusen großzügige Vorhäfen, in denen ein-

und ausführende Schiffe und Schiffszüge durch die zu- oder abströmende Kraftwassermenge nicht behindert werden. Im allgemeinen und bei Beschränkung auf ein erprobtes Maß kann die Schifffahrt vom Anfahren der Turbinen auf Voll- oder zeitweise Überlast rechtzeitig unterrichtet werden. Ein Ausfall des Energienetzes dagegen, der an der Laufkraftstufe automatisch und plötzlich zu einschneidenden Veränderungen des Betriebszustandes von Kraftwerk und Wehr führt, trifft den Schifffahrtsbetrieb völlig unvorbereitet. Es müssen daher Maßnahmen getroffen werden, um in solchen Fällen die Schifffahrt vor Schäden zu bewahren.

Über die gegenseitigen Abhängigkeiten von Schifffahrts- und Kraftwerksbetrieb, über die Möglichkeiten ihrer Beeinflussung und über die Methodik des Betriebs soll an Hand zweier praktischer Beispiele berichtet werden.

I. Donaukraftwerk Jochenstein

1. Ergebnisse von wasserbaulichen Modellversuchen bei plötzlicher Entlastung des Kraftwerkes [1]

(Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe)

Die Laufkraftstufe Jochenstein staut die Donau unterhalb von Passau durch ein Wehr mit 6 Öffnungen von je 24,0 m lichter Weite auf, die durch 6 gleiche Doppelhakenschütze von 11,80 m Konstruktionshöhe verschlossen sind. Die Fallhöhe ($H_a = 9,6$ m) wird im Kraftwerk durch 5 Turbinen mit einer Nenn-Schluckfähigkeit von zusammen $Q_a = 1750$ m³/s ausgenutzt. Stau- und Kraftwerkskörper sind voneinander getrennt. Kraftwerks- und Wehrachse liegen auf einem Bogen vom Radius $R = 1500$ m, wobei das Kraftwerk links vom Wehr am Innenbogen, der Stromkrümmung angeordnet ist. Die Schifffahrt umgeht Wehr und Kraftwerk durch einen 1200 m langen Kanal, in dem die Fallhöhe durch 2 Schleusen von je 24 m lichter Breite und 230 m Länge überwunden wird (Bild 1):

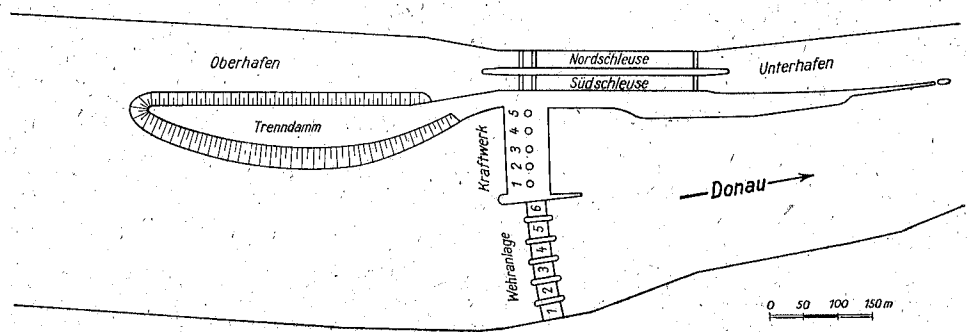


Bild 1 Donaukraftwerk Jochenstein. Grundriß.

Da die Schifffahrtsanlagen zweckentsprechend angeordnet und gebaut sind, beeinflussen sich Kraftwerks- und Schifffahrtsbetrieb solange nicht unmittelbar, als das Kraftwerk normal betrieben wird. Fällt jedoch ausnahmsweise das Energienetz aus, so sperren infolge der gleichzeitigen und plötzlichen Entlastung der Generatoren die automatischen Regler den Zufluß zu den Turbinen in kurzer Zeit auf 8—10 % der Vollwassermenge ab. Die plötzliche Verminderung der Durchflußmenge erzeugt im Oberwasser einen Stau- oder Absperrschwall, im Unterwasser einen Absperrsink.

Beide Erscheinungen könnten bei den in Jochenstein vorhandenen Größenverhältnissen für die Schifffahrt gefährlich werden, wenn geeignete Gegenmaßnahmen nicht rasch zur Wirkung kämen. Als solche stehen für sich oder in Verbindung miteinander zur Wahl: Umsetzung der ausfallenden Energie in Wärme (Wasser- oder Metallwiderstände), Ableitung der überschüssigen Wassermenge in besonderen Entlastungskanälen, Vergrößerung der Leerlaufwassermenge oder Verlängerung der Schließzeit der Turbinen soweit dies die Massivbauteile des Kraftwerks zulassen, und endlich Schnellsenken der Wehrverschlüsse zur raschen Ableitung der Ausfallwassermenge.

Da die Schwall- und Sunkwellen durch Auflaufen am Ufer des gekrümmten Flußlaufes, durch Reflexionen und durch Querschnittsänderungen einen dauernden Wechsel an Höhe, Form, Richtung und Laufgeschwindigkeit erfahren, ist eine exakte Berechnung kaum möglich. Zu ihrer genaueren Erfassung wurden daher für das Donaukraftwerk Jochenstein — unter Beschränkung auf den Oberwasserbereich — Modellversuche im Maßstab 1:55 ausgeführt. Die Wasserspiegelbewegungen, die nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz auf die Natur umgerechnet werden können, wurden an 40 über die ganze Modellstrecke verteilten Pegeln erfaßt [2]. Die Modellversuche sollten gleichzeitig dazu dienen, geeignete hydraulische Maßnahmen zu finden, durch die schädliche Schwall und Sunkerscheinungen vermieden werden.

Die Ausbreitung und Verformung der von der Krafthausbucht ausgehenden Schwallwellen wurden für das Rheinkraftwerk Birsfelden in dem Beitrag „Wirkung von Kraftwerksschwallen auf die Fahrwassertiefen“ des Schiffahrtskongresses 1953 in Rom ausführlich behandelt [3]. Da die Ausbreitungs- und Verformungsvorgänge beim Donaukraftwerk Jochenstein wegen des ähnlichen Grundrisses annähernd gleich sind, beschränken sich die folgenden Ausführungen im wesentlichen auf die Wasserspiegelbewegungen im Schiffahrtsbereich und die Möglichkeiten ihrer Verminderung.

Erreicht die stromauf laufende Schwallwelle die Einfahrt des oberen Vorhafens (Bild 1), so erzeugt die Wasserspiegeldifferenz zwischen Strom und Schleusenvorhafen eine in den Vorhafen einlaufende Hebungs- welle, deren Front eine langgestreckte Neigung besitzt. In dem sich verengenden Vorhafen nehmen Höhe und Neigung der Hebungs- welle zu, in verstärktem Maße an der fast plötzlichen Querschnittsverengung der Schleusenhäupter. Die vereinfachende Annahme einer sprunghaften Verdoppelung der Wellenhöhe am Unterhaupt ist nur theoretisch. In Wirklichkeit überlagert sich die Reflexion der langen, flach geneigten Wellenfront am Schleusenuntertor allmählich, so daß die Hebung des Wasserspiegels bis zur totalen Reflexion ein stetiger Vorgang ist (Bild 2). Infolge der Querschnitts-

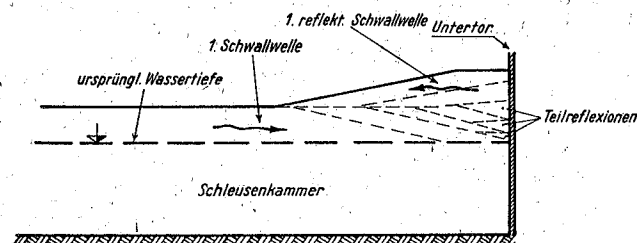


Bild 2 Überlagerung einer ersten Schwallwelle und ihrer Reflexion am Unterort.

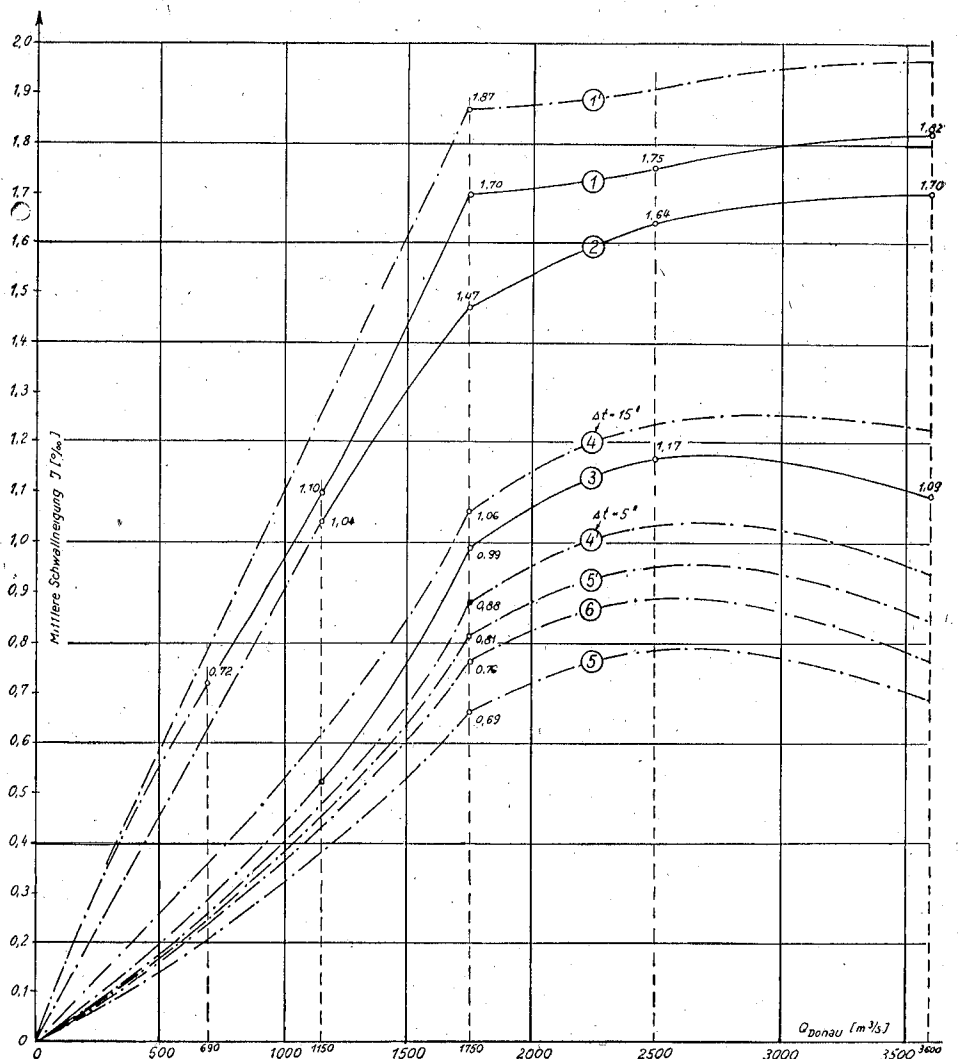


Bild 3 Donaukraftwerk Jochenstein. Im Modell ermittelte Verminderung der Schwallneigung in der Schleuse.

- Kurve (1) Abschluß der Turbinen auf $Q_L = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ in 7 sec; ohne Wehrbedienung.
- Kurve (2) Abschluß der Turbinen auf $Q_L = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ in 7 sec; Senken der Oberschütze mit 15 sec. Verzögerung.
- Kurve (3) Abschluß der Turbinen auf $0,5 \times Q$ in 7 sec, von $0,5 \times Q$ auf $Q_L = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ in 66 sec; Senken der Oberschütze mit 15 sec Verzögerung.
- Kurve (4) Abschluß der Turbinen auf $0,3 \times Q_a$ in 7 sec, von $0,3 \times Q_a$ auf $Q_L = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ in 66 sec; Senken der Oberschütze mit 5 bzw. 15 sec Verzögerung.
- Kurve (5) Abschluß der Turbinen auf $0,3 \times Q$ in 10 sec, von $0,3 \times Q_a$ auf $Q_L = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ in 66 sec; Senken der Oberschütze mit 5 sec Verzögerung.

Kurve (6) wie Kurve (5), jedoch Senkgeschwindigkeit $C = 4,14 \text{ cm/s}$.

Kurven (1') und (5'): nur ein Obertor geöffnet.

Kurven (1) bis (6) und (4'): beide Obertore geöffnet.

änderungen und Reflexionen entstehen in der Schleusenammer abwechselnd Schwall- und Sunkwellen, die eine nur schwach gedämpfte Schwingung hervorrufen.

Nach den Modellversuchen nimmt ein vom Schwall getroffenes Schiff die gleiche Neigung ein wie der Wasserspiegel, wenn nur die Schwallwelle länger ist als das Schiff. Diese Voraussetzung ist hier gegeben. Dabei erfährt das Schiff bei einem Bruttogewicht G

die Längskraft $P = G \times \sin \alpha(t)$

oder, da für kleinere Werte von α $\sin \alpha \approx \text{tg } \alpha = J$,

$$P = G \times J(t)$$

wobei $J = \text{Wasserspiegelneigung} = \text{Schiffsneigung}$.

Für den Einfluß der Schwallwellen auf die Schifffahrt ist also nicht nur ihre absolute Höhe, sondern entscheidender ihr Gefälle maßgebend.

Bei Abschluß der 5 Turbinen in 7 sec auf eine Leerlaufwassermenge von 8 % der Ausbauwassermenge nahm die im Modell gemessene Neigung der Schwallwelle in den Schleusenammer bis $Q_a = 1750 \text{ m}^3/\text{s}$ annähernd linear zu. Mit steigendem Abfluß in der Donau wächst die Neigung der Hebungselle nur noch wenig an (Bild 3). Sind die Obertore beider Schleusenammern geöffnet, dann hat die Schwallwelle in den Kammern für $Q_a = 1750 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Neigung von 1,70 ‰ (Kurve 1). Ist nur eine Kammer offen, beträgt die Neigung sogar 1,87 ‰ (Kurve 1').

Ein mit oder gegen die Schwallfront fahrendes oder ein in der Schleuse liegendes Schiff erfährt somit eine Längskraft von $P = G \times 1,7/1000$ bzw. $G \times 1,87/1000$ (t). Für einen 1000 t-Kahn mit 1240 t Bruttogewicht ist diese Längskraft mit 2,11 bzw. 2,32 t weitaus größer als die bei Schleusenfüllungen zugelassene Längskraft von 1,6 t. Ist der vom Schwall getroffene Schleppkahn mit einer Trosse verheftet und die Trosse gestrafft, so hat sie die entsprechende Komponente der oben ermittelten Kraft aufzunehmen. Hängt dagegen die Trosse schlaff, dann bewegt sich das Schiff und erlangt dabei eine kinetische Energie von der Größe

$$P' \times s = m \times v^2/2$$

Bei Straffung der Trosse ist ihre Belastung P' wesentlich von der Geschwindigkeit v und dem Bremsweg s abhängig. Sie kann ein Vielfaches der Kraft $P = G \times J$ betragen. Ein lose in der Schleusenammer liegendes Schiff wird so lange beschleunigt, bis es eine konstante Geschwindigkeit erreicht hat. Das Schiff bewegt sich dann, bis es entweder am Untertor anstößt, oder infolge Änderung der Wasserspiegelneigung seine Bewegungsrichtung ändert.

Um diese Einwirkungen der Schwallbewegungen auf die Schifffahrt zu vermindern, wurden im Modell folgende Möglichkeiten der Schwallentlastung untersucht:

1. Senken der Wehrverschlüsse mit und ohne Verzögerung,
2. Verlängerung der Turbinenschließzeit,
3. Vergrößerung der Leerlaufwassermenge ohne und mit Senken der Wehrverschlüsse.

Wird bei Ausfall der Turbinen lediglich eine entsprechende Anzahl von Wehrverschlüssen mit der vorgesehenen Verzögerung von 15 sec und einer Geschwin-

digkeit von 6,5 cm/s gesenkt, dann können die Schwallhöhen und -neigungen nur wenig verringert werden (Bild 3, Kurve 2). Auch wenn die Wehrverschlüsse gleichzeitig mit dem Beginn des Turbinenschließens gesenkt werden, ist die Abnahme der Schwallbewegungen nur gering. Ein wirksamer Einfluß auf Höhe und Form der Schwallwellen ist erst dann zu erwarten, wenn die nichtstationäre Wehrwassermenge fast ebenso rasch zunimmt wie die Turbinenwassermenge gedrosselt wird. Das läßt sich aber nur erreichen, wenn die Wehrverschlüsse, ähnlich wie beim Rheinkraftwerk Birsfelden, schnell gesenkt werden. Dort werden die Antriebsmotore ausgekuppelt und die mit 15 cm/s freifallenden Schütze durch Öl-druckbremsen abgefangen.

Bei größerer oder kleinerer Turbinenschließzeit ändern sich hauptsächlich die Spitzenwerte und in ganz geringem Maße die Neigungen der Schwallwelle, dagegen bleibt die mittlere Schwallhöhe annähernd gleich, da auch die Wassermengenänderung ΔQ (Ausfallwassermenge) die gleiche bleibt.

Merklich vermindert wird die Schwallneigung, wenn die Leerlaufwassermenge vergrößert wird, wenn also nicht nur die gesamte Ausfallwassermenge ΔQ , sondern auch die sekundliche Wassermengenänderung $\Delta Q / \Delta t$ vermindert wird. So konnte für die Ausbauwassermenge $Q_a = 1750 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem Abschluß aller Turbinen auf $0,3 \times Q_a$ in 7 sec ohne Senken der Wehrverschlüsse die Neigung der Schwallwelle auf 1,29 ‰ reduziert werden. Bei Abschluß auf eine Leerlaufwassermenge von $0,5 \times Q_a$ nahm die Schwallneigung sogar auf 1,04 ‰ ab. Wird zusätzlich bei einem Abschluß auf $0,3 \times Q_a$ die Turbinenschließzeit auf 10 sec verlängert, dann kann die Neigung der Hebungswelle in der Schleuse auf 1,09 ‰ gegenüber 1,29 ‰ bei 7 sec Schließzeit vermindert werden. Der Wasserspiegel hebt sich dabei um maximal 70 cm.

Werden bei der vergrößerten Leerlaufwassermenge auch noch die Wehrverschlüsse mit 15 sec Verzögerung und einer Geschwindigkeit von 6,5 cm/s gesenkt, so ist eine wesentliche Verminderung der Schwallneigung gegenüber den Versuchen ohne Wehrbedienung nicht festzustellen (Kurven 3 und 4). Dem Wehrsenken fällt dabei lediglich die Aufgabe zu, den Wasserspiegel in räumlichen und zeitlichen Mittel auf Höhe des Stauzieles zu halten. Der Einfluß des Wehrsenkens auf die Schwallneigung war bei den Modellversuchen erst zu erkennen, wenn die Wehrverschlüsse mit 5 sec oder weniger Verzögerung abgesenkt wurden (Bild 3, Kurve 4').

Als wichtigstes Ergebnis der Modellversuche ist folgender praktisch durchführbare Betriebsfall anzusehen (Bild 3, Kurve 5): Drosselung der Turbinen in 10 sec auf $0,3 \times Q_a$, in weiteren 66 sec auf $Q_L = 0,08 \times Q_a$ und Senken der Oberschütze 5 sec nach Beginn des Turbinenschließens mit $c = 6,5 \text{ cm/s}$. Die hierfür bei $Q_a = 1750 \text{ m}^3/\text{s}$ in den beiden Schleusenkammern gemessene Neigung der Schwallwelle von 0,69 ‰ kann für die Schifffahrt als ungefährlich angesehen werden. Ist nur eine Schleusenkammer geöffnet, so nimmt die Schwallneigung auf 0,81 ‰ zu (Kurve 5').

Werden bei sonst gleichen Betriebsbedingungen die Oberschütze anstatt mit 6,5 cm/s mit $c = 4,14 \text{ cm/s}$ abgesenkt, so beträgt die Neigung der Hebungswelle in beiden geöffneten Schleusenkammer 0,76 ‰ (Kurve 6). Auch dieser Wert kann als noch ungefährlich für die Schifffahrt gelten.

Im Unterwasser ist eine Verminderung der Sunkbewegungen im gleichen Maße zu erwarten.

2. Versuchsergebnisse der Fa. Voith, Heidenheim [4]

Durch die Untersuchungen der Fa. Voith sollten von der turbinentechnischen Seite die Möglichkeit einer vergrößerten Leerlaufwassermenge und eine zu erwartende Belastungssteigerung im Saugrohrkrümmer überprüft werden.

Bei einer Kaplan turbine ist für eine bestimmte Drehzahl außer dem Leerlauf mit dem Wassermengenminimum von 8 % der Vollwassermenge auch noch bei jedem Laufradwinkel ein Leerlaufbetrieb möglich. Die erforderliche Leerlaufwassermenge ist um so größer, je größer der Laufradwinkel ist, dem jeweils eine bestimmte Leerlaufstellung des Leitrades zugeordnet ist.

Theoretisch könnte ein Schwall völlig vermieden werden, wenn bei voller Laufradöffnung und vergrößerter Drehzahl die Vollwassermenge im Leerlaufbetrieb durch die Turbine abgeführt würde. Bei einem derartigen Betriebszustand treten jedoch wegen der geringen Laufschaufelbelastung in der Austrittsströmung des Laufrades sehr große Rotationskomponenten auf. Die Folge davon ist, daß sich in der Austrittsströmung ein Totwasserkern und einzelne Wirbelschläuche bilden, die sich mit einer bestimmten Frequenz um diesen Kern drehen. Diese Wirbel, die unter Umständen in ihrem Innern Dampfkavernen enthalten, verursachen heftige Schläge gegen die Saugrohrwand und periodische Schwankungen der Durchflußmenge, die zu schweren Erschütterungen des ganzen Bauwerks führen können [5]. Ganz besonders gefährdet erscheint die schräg angeströmte Saugrohrstützwand.

Durch geeignete Belüftung gelingt es, die Wucht dieser Schläge und die Erschütterungen wesentlich zu dämpfen. Bei der großen Durchflußmenge einer Kaplan turbine ist für eine ausreichende Dämpfung auch eine relativ große Luftmenge erforderlich. Deshalb sind die Einlaßöffnungen für die Zusatzluft an solche Stellen zu legen, an denen gegenüber der Atmosphäre Unterdruck herrscht, so daß die Belüftung ohne eine umfangreiche Kompressoranlage bewerkstelligt werden kann.

Für eine Luftzufuhr in die Turbinenströmung bestanden 2 Möglichkeiten:

- a) Luftzufuhr am Wasserführungsschild vor dem Laufrad,
- b) Zentrale Belüftung des Raumes hinter dem Laufrad durch die Welle.

Die Messungen an einer Modell turbine im Maßstab 1 : 10,3 ergaben, daß an der Lufteinlaßstelle am Wasserführungsschild für den ganzen Fallhöhenbereich und bis zum größten Laufradwinkel ausreichender Unterdruck herrscht, um die notwendige Luft zu fördern. Die erforderlichen Querschnitte für die Einlaßlöcher sind an dieser Stelle leicht unterzubringen. Für eine zentrale Belüftung durch die Turbinenwelle wurden Druckmessungen am Zentrum der Laufradnabe vorgenommen. Die Unterdrucke waren aber dort nur halb so groß wie am Wasserführungsschild. Außerdem wäre es bei der augenblicklichen Bauweise auch nicht möglich, in der Turbinenwelle die Querschnitte für die großen Luftmengen zu schaffen.

Druckmessungen an den Seitenwänden, an der Innenkrümmung und an der Sohle des Saugschlauches zeigten, daß bei allen untersuchten Fallhöhen und Laufradwinkeln noch Überdruck herrscht. Den mittleren Drücken sind dabei recht beträchtliche Druckschwankungen überlagert, deren Größe mit der Einheitsdrehzahl und der Wassermenge anwächst. Auch an der Saugrohrsohle konnten während des Leerlaufbetriebes keine Strömungen mit hohen Unterdrücken, die zu einer Zerstörung der mit Platten belegten Sohle Anlaß geben könnten, festgestellt werden.

Besonders beansprucht erscheint dagegen beim Leerlaufbetrieb die Stützwand im Saugrohr. Bei der linksdrehenden Turbine wurden bei einer Drehzahlerhöhung um 30 % am oberen Ende der rechten Stützwandseite (in Strömungsrichtung gesehen) die größten Unterdrücke gemessen. Ihnen sind Schwankungen im Betrage von etwa $\pm 14\%$ der Fallhöhe überlagert. Durch Luftzufuhr konnten die Druckschwankungen auf etwa die Hälfte vermindert werden. Da jedoch nicht mit Sicherheit bekannt ist, ob für diesen Fall die Modellgesetze noch volle Gültigkeit haben, läßt sich nicht abschätzen, ob am Naturbauwerk ein gleich großer Effekt erzielt wird. Die ohne Luftzufuhr am Modell gemessenen Werte lassen sich dagegen unmittelbar auf die Großausführung übertragen.

Die Frequenz der Druckschwankungen, die mit der Drehzahl des Laufrades gekoppelt ist, beträgt etwa $\frac{1}{3}$ der Laufraddrehungen. Bei einer Laufraddrehzahl von 65,2 U/min entspricht dies einer Frequenz der Druckschwankungen von etwa 0,4 Hz. Diesen Druckschwankungen, deren Amplitude etwa 14 % der Fallhöhe beträgt, sind Schwingungen höherer Frequenz (Drehzahl $\times$ Schaufelzahl), aber kleinerer Amplitude überlagert.

Zusammenfassend läßt sich über die Druckmessungen bei Leerlaufbetrieb folgendes sagen:

Solange Überdrehzahlen nicht zugelassen werden, bleiben die Druckschwankungen im Saugkrümmer kleiner als $1,0 \times H$ (H = Fallhöhe), an der Stützwand kleiner als $0,1 \times H$. Die Leerlaufwassermenge bewegt sich dabei zwischen 40 und 55 % der Vollwassermenge, je nach Wahl des Laufradwinkels. Bei 30 % Überdrehzahl wachsen die Druckschwankungen im Saugkrümmer auf $1,5 \times H$, an der Stützwand auf $0,6 \times H$ an.

Die Messungen an der Stützwand ergaben als Mittelwert von Druck und Sog auf Vorderseite und Rückseite maximal $5,70 \text{ t/m}^2$ einschließlich Schwankung. Auf Grund dessen wurde für die statische Berechnung der Stützwand eine maximale Querbelastung von 10 t/m^2 angenommen.

Die eigene Frequenz der Stützwand wurde zu 284 Hz ermittelt, so daß gegenüber der Frequenz der Druckschwankungen von 0,4 Hz eine erhebliche Sicherheit gegen Resonanzwirkungen vorhanden ist. Die konstruktive Gestaltung und die Bewehrung der Stützwand und ihres besonders beanspruchten oberen Endes (Stützwandkopf) bereitete keinerlei Schwierigkeiten.

3. Messungen in der Natur [6] [7] [8]

Am 25. Januar 1956 erfolgten im Donaukraftwerk Jochenstein die ersten Abschaltversuche. Dabei waren die von der Fa. Voith gelieferten landseitigen Turbinen 3 bis 5 so geregelt, daß sie in 7 sec auf die normale Leerlaufwassermenge schlossen. Bei der Abschaltung der Maschinen wurde am Turbineneinlauf ein Absperrschwall von etwa 70 cm beobachtet.

Am gleichen Tag wurden am Turbinenblock 5 auch die Bewegungen und Erschütterungen des Bauwerks bei verschiedenen Leerlaufwassermengen und beim Abschalten auf erhöhten Leerlaufdurchfluß untersucht. Im einzelnen wurde das Verhalten von Turbinenblock 5 beobachtet:

1. bei leerlaufender Turbine und konstanter Drehzahl, wobei die Stellung der Turbinenschaufeln von $\varphi = 0$ bis $\varphi = 32^\circ$ in Stufen von je 4° variiert und nach Einregelung auf $n = 65 \text{ U/min}$ gemessen wurde,
2. bei Netzabschaltung mit automatischem Schnellverschluß, wobei die Turbine bei $\varphi = 20^\circ$ und bei $\varphi = 32^\circ$ und belastetem Generator gefahren und nach

Abwurf der Last das Verhalten des Bauwerks während des Regelvorgangs beobachtet wurde.

Die Messungen erstreckten sich auf die Relativbewegungen des Blockes 5 gegen Block 4 sowohl parallel als auch senkrecht zur Flußrichtung und auf die Erschütterungen der Saugschlauchwand zwischen Turbine 5 und 4 quer zur Flußrichtung.

Für die Leerlaufversuche sind die Verschiebungen zwischen Block 5 und 4 in Abhängigkeit von der Laufradstellung und damit von der Leerlaufwassermenge in Bild 4 aufgetragen. Meßwerte sind die jeweiligen Maximalamplituden. Die Bild 4 zugrunde liegenden Oszillogramme zeigten sehr deutlich, daß den lang-

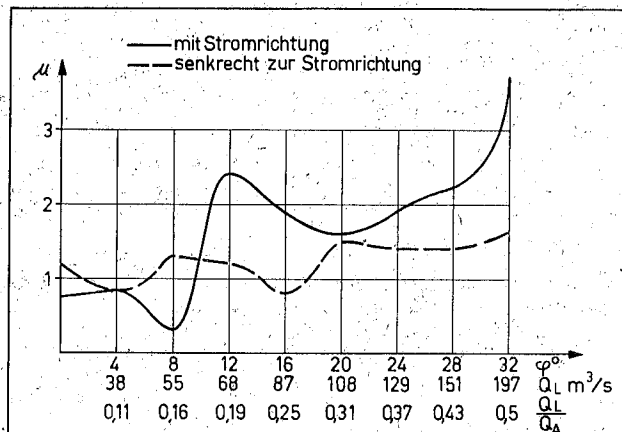


Bild 4: Leerlaufversuche
Maximalbewegung Turbinenblock 5 (Landseite)

Bild 4 Leerlaufversuche. Maximalbewegung Turbinenblock 5 (Landseite)

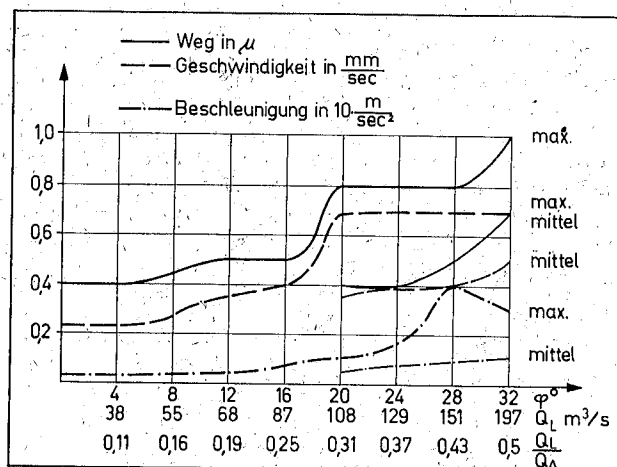


Bild 5: Leerlaufversuche
Messung Saugschlauchtrennwand zw. Turbine 5 u. 4

Bild 5 Leerlaufversuche. Messung Saugschlauchtrennwand zwischen Turbine 5 und 4.

samen Blockbewegungen noch höher frequente Schwingungen überlagert waren, deren Frequenz bei den Bewegungen in Flußrichtung bei etwa 50 Hz lag, während die Schwingungen quer zur Flußrichtung eine Frequenz von 200 bis 250 Hz aufwiesen. Die Grundschiwingung des Blockes lag bei etwa 5 Hz. Eine gewisse Unsicherheit bei den Messungen ergibt sich aus der Verwendung von Block 4 als ruhendem Punkt, da dieser ja ebenfalls gewisse Eigenbewegungen ausführte.

Bei den Abschaltversuchen ergab sich eine max. Bewegung des Blockes 5 in Flußrichtung von 30μ , bei einer Leerlaufwassermenge von $177 \text{ m}^3/\text{s} = 0,5 \times Q_a$ ($\varphi = 32^\circ$). Die Schwallwelle, die zur Erreichung einer max. Amplitude etwa 2,2 sec benötigte und die damit verbundenen langsamen Blockbewegungen waren nach etwa 15 sec soweit abgeklungen, daß sie in der Amplitude der Blockerschütterungen nicht mehr erkennbar waren. Dabei hatte der Block etwa drei ganze Schwingungen ausgeführt, woraus sich eine Periodendauer von etwa 5 sec ergibt.

Die Messungen an der Saugschlauchseitenwand (Bild 5) zeigten während der Leerlaufversuche außer annähernd regelmäßig auftretenden Ausschlägen auch schlagartige und sehr unregelmäßig erscheinende Spitzenwerte. Da die Beobachtung solcher Spitzenwerte einer gewissen Unsicherheit unterliegt, wurden in Bild 5 auch noch die Werte der regelmäßig auftretenden mittleren Amplituden aufgenommen. Ein ausgeprägter Unterschied zwischen Spitzenwert und regelmäßiger Amplitude ergab sich erst bei $\varphi > 20^\circ$.

Bei den Abschaltversuchen konnte an der Saugschlauchseitenwand nur der Größtwert der Geschwindigkeit v_{max} beobachtet werden. Er ergab sich zu 0,77 und 1,8 mm/sec bei $\varphi = 20$ bzw. 32° . Aus den Werten der Leerlaufversuche läßt sich schließen, daß die Abschaltung bei $\varphi = 20^\circ$ im Saugschlauch etwa dieselbe Beanspruchung verursacht wie der Leerlauf bei $\varphi = 32^\circ$. Es entspricht dies einer maximalen Auslenkung der Trennwand von ca. 1μ . Bei der Abschaltung von $\varphi = 32^\circ$ dürfte die Auslenkung der Seitenwand den Wert von 3μ nicht überschritten haben.

Bei allen Versuchen wurden neben dem Saugschlauch knallartige Geräusche wahrgenommen. Es war jedoch nicht jeder akustische Stoß als Trennwandbewegung feststellbar. Die größte Stoßhäufigkeit trat bei $\varphi = 16^\circ$ auf. Bei noch größerem φ nimmt die Häufigkeit ab und die Intensität der Stöße zu. Bei $\varphi = 32^\circ$ gingen die Stöße in ein mehr tosendes Geräusch über, dessen Intensität akustisch nur schwer beurteilbar war.

Zusammenfassend läßt sich über die Zulässigkeit der beobachteten Bewegungen und Erschütterungen mangels eines objektiven Maßstabes lediglich sagen, daß der Eindruck bestand, daß sie für das Bauwerk weder unzuträglich groß noch gefährlich sind. Risse, Sprünge oder sonstige Schäden sind bei den Versuchen in keinem Bauteil eingetreten.

Am 8. Juni 1956 wurde am Donaukraftwerk Jochenstein ein weiterer Abschaltversuch ausgeführt. Zu diesem Zeitpunkt war folgender Bauzustand der Staustufe vorhanden:

Sämtliche 6 Wehrfelder waren fertig montiert und installiert. Wehrfeld 3 befand sich in Reparatur und war mit Dammbalken abgeschlossen. Das Wehrfeld 1 konnte wegen Beschädigungen nur begrenzt bewegt werden. Im Kraftwerk standen die Maschinen 1, 3, 4 und 5 in Dauerbetrieb (Bild 1).

Die Wasserführung der Donau betrug am Versuchstag $2326 \text{ m}^3/\text{s}$, von denen etwa $1460 \text{ m}^3/\text{s}$ in den 4 Turbinen verarbeitet wurden. Die Restwassermenge wurde über die Wehrfelder 1 und 2 geleitet.

Während des Versuches wurde der Generator 4 getrennt von den übrigen Maschinen auf eine Sammelschiene geschaltet und diente zur Versorgung des Eigenbedarfs. Die Generatoren 1, 3 und 5 wurden durch Auslösen eines Schalters gleichzeitig entlastet. Die Turbinen 3 und 5 (Voith, Heidenheim) schlossen dabei wie bei den Versuchen vom 15. 1. 1956 in 7 sec. Eine vergrößerte Leerlaufwassermenge war noch nicht eingestellt. Die Turbine 1 (Escher Wyss) schloß nach dem von dieser Firma normal angewendeten Schließvorgang mit verzögertem Abschluß des Leitrades. In einem gesonderten Abschaltversuch war für diese Turbine am Einlauf ein Absperrschwall von nur 6 cm beobachtet worden.

Eine Sekunde nach der Auslösung des Freileitungsschalters erhielten die Wehrverschlüsse 4, 5 und 6 den Senkbefehl. Sie wurden dabei in 90 sec um 3,75 m, einschließlich 0,30 m Freibord, gesenkt, um die Ausfallwassermenge von etwa 1000 m³/s abzuführen.

In Bild 6 ist die Charakteristik des Abschlußvorganges (Änderung der Drehzahl und des Durchflusses) und die geplante Schwallsteuerung (Vergrößerung der Leerlaufwassermenge) für die beiden Turbinensysteme in ihrem ungefähren

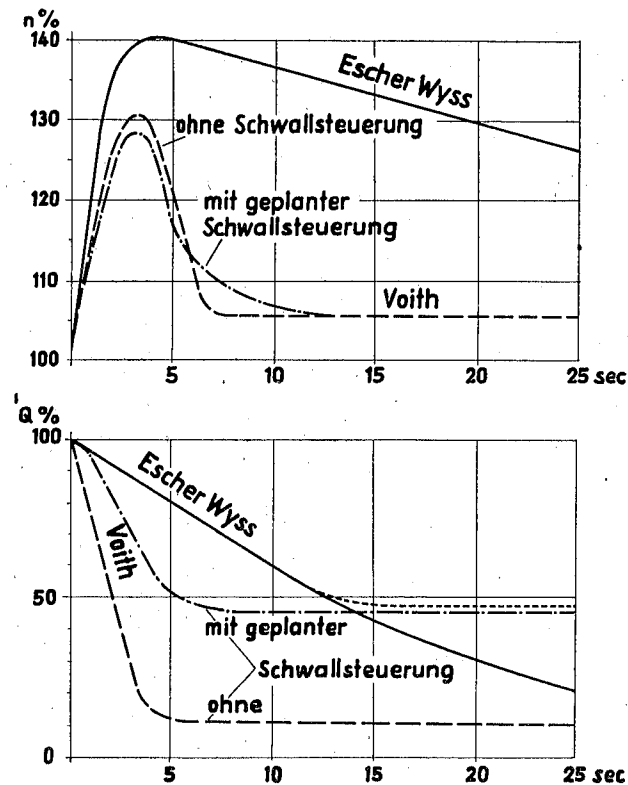


Bild 6: Charakteristik des Abschlußvorganges der Turbinen des Donaukraftwerkes Jochenstein.

Bild 6 Charakteristik des Abschlußvorganges der Turbinen des Donaukraftwerkes Jochenstein.

Verlauf skizziert. Die endgültige Ausführung der Schwallsteuerung soll die Forderung erfüllen, daß bei einem möglichst langsamen Übergang vom Ausbaudurchfluß zum erhöhten Leerlaufdurchfluß mit Rücksicht auf den Antrieb des Wehres eine unzulässig hohe und lange andauernde Überdrehzahl der Turbine vermieden wird.

Eine gewisse Störung des Versuchs trat dadurch ein, daß nach Lastabwurf die langsamer schließende Maschine 1 zunächst die bereits geschlossenen Turbinen 3 und 5 unter Lastaufnahme hochzog, so daß sich die Laufräder dieser Turbinen in der Leerlaufwassermenge etwas schneller als im normalen Leerlauf drehten. Die Wirkung dieser Störung auf die beobachteten Schwall- und Sunkerscheinungen ist jedoch so unwesentlich, daß sie bei der Beurteilung des Versuchsergebnisses vernachlässigt werden kann.

Die Wasserspiegelbewegungen wurden im Oberwasserbereich, einschließlich Vorhafen und Südschleuse an 11 Pegeln, im Unterwasserbereich an 5 Pegeln in Zeitintervallen von 10 sec abgelesen. Gleichzeitig war in der Nähe des Oberhauptes der geöffneten Südschleuse ein Schleppkahn von etwa 720 t Bruttogewicht verheftet. Die Höhenlagen von Bug und Heck des Schleppkahnes wurden ebenfalls in Zeitintervallen von 10 sec ermittelt, während die Belastung der Trossen mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen kontinuierlich registriert wurde [2].

Um die Auswirkungen des Schalles in der Schleuse beurteilen zu können, sind in Bild 7 über dem gleichen Zeitmaßstab aufgetragen:

1. Die Wasserspiegeldifferenz zwischen den Pegeln am Mittelmauerkopf und in Schleusenmitte (vor und hinter dem Schleppkahn). Bei einem Pegelabstand von etwa 200 m gibt diese Kurve unter Verwendung der rechten Skala gleichzeitig die Wasserspiegelneigung.
2. Die Neigung des Schleppkahnes (linke Skala) und die Schiffskräfte in Längsrichtung aus $P = G \times J$ mit $G = 720 \text{ t}$ (rechte Skala).
3. Die gemessene Trossenkraft.

Ein Vergleich der drei Kurven zeigt, daß die Schiffsneigung fast unmittelbar der Wasserspiegelneigung der ersten Schwallwelle folgt und daß zur gleichen Zeit die oberstromige Trosse beansprucht wird. Für die am Untertor reflektierte Welle trifft diese zeitliche Übereinstimmung nicht mehr so gut zu. Dies liegt vermutlich daran, daß die Wasserspiegelbewegungen am Mittelmauerkopf nicht die gleichen sind wie unmittelbar vor dem Schleppkahn. Die Kurve 1 in Bild 7 ist demnach nicht die tatsächliche Wasserspiegelneigung längs des Schiffes, sondern kann nur näherungsweise als Anhalt dazu dienen.

Während die Schwallwelle am Untertor aufläuft und dabei ihre Höhe annähernd verdoppelt, sinkt der Wasserspiegel am Oberhaupt infolge eines natürlichen Schwingungsvorganges und verstärkt durch die vom Wehrsenken erzeugte Sunkwelle erheblich unter den Ausgangswasserspiegel ab. Dadurch wird die Neigung der zum Oberhaupt zurücklaufenden Welle annähernd doppelt so groß wie die Neigung der ersten, einlaufenden Schwallwelle. Diese Feststellung ist insofern beachtenswert, als bisher angenommen wurde, daß die primäre, in die Schleuse einlaufende Welle die größte Neigung hervorruft. Allerdings konnte bei den entsprechenden Modellversuchen für das Donaukraftwerk Jochenstein und auch bei ähnlichen Versuchen für andere Anlagen wegen der begrenzten Modelllänge nur die erste Hebungswelle erfaßt werden. Weitere Beobachtungen waren dann bereits durch die am Modelleinlauf reflektierten Wellen verfälscht.

Da die Trossen mit der Schiffsachse einen Winkel α einschließen, müssen die theoretischen Schiffskräfte P mit $1/\cos \alpha$ multipliziert werden, um daraus auf die theoretischen Trossenkräfte P_{Tr} schließen zu können. Vergleicht man die theoretischen (Kurve 2) mit den tatsächlich gemessenen Trossenkräften (Kurve 3), dann zeigt sich, daß die gemessenen maximalen Trossenkräfte zum Unterhaupt um $\approx 40\%$, zum Oberhaupt um $\approx 20\%$ größer sind. Der Grund hierfür ist wohl darin zu suchen, daß die Trossen nicht vollständig gestrafft waren und daher auch noch eine Kraft zur Abbremsung der Bewegung aufzunehmen hatten.

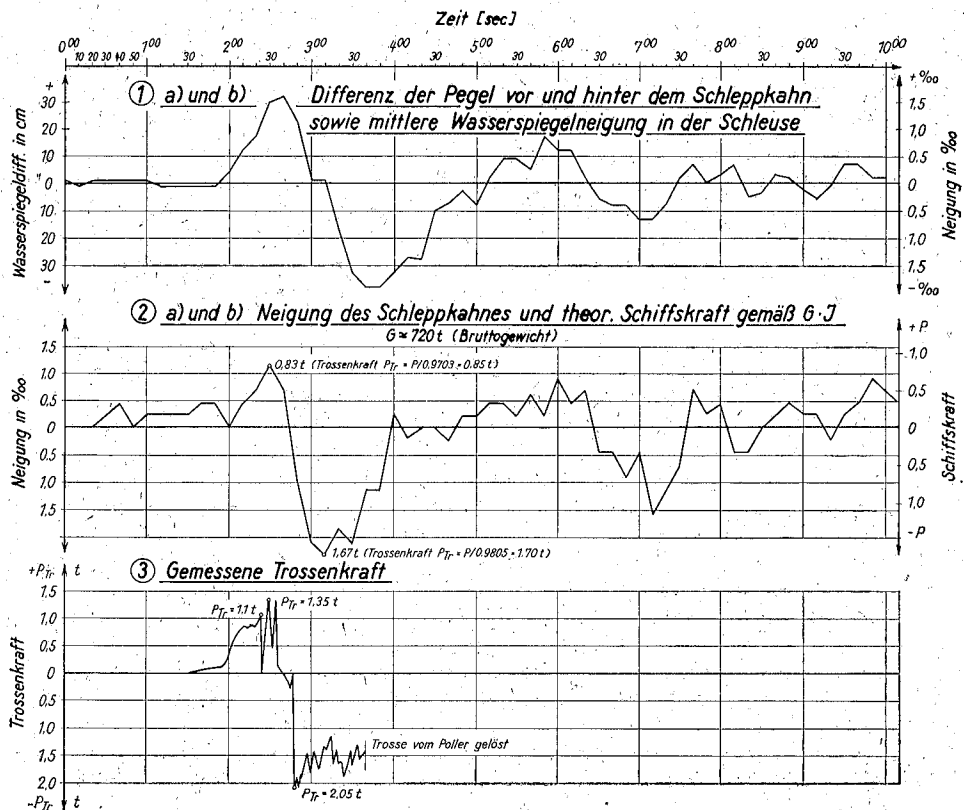


Bild 7 Donaukraftwerk Jochenstein. Zeitlicher Verlauf der Wasserspiegelneigung, der Schiffsneigung und der Trossenkräfte in der Südschleuse während des Abschaltversuches am 8. 6. 1956.

Diese Annahme scheint insofern berechtigt, als in der registrierten Trossenkraftkurve (3) kurzzeitige Entlastungen zu erkennen sind. Sie haben zur Folge, daß die Trossen nicht gleichmäßig zunehmend, sondern ruckartig belastet werden.

Ein zahlenmäßiger Vergleich der beim Großversuch ermittelten Wellenhöhen mit denen des Modellversuches ist nicht unmittelbar möglich, da für den am 8. 6. 1956 herrschenden Betriebszustand Modellversuche nicht ausgeführt wurden. Sehr gute Übereinstimmung mit den Modellversuchen zeigt jedoch der zeitliche Verlauf der Schwallwelle sowohl im Stauration, als auch im Schiffsahrts-

bereich. Auch das Verhältnis der Wellenhöhe vor dem Krafthaus zur Wellenhöhe in der Schleuse, sowie die Abnahme der Wellenhöhe entlang dem Trenndamm entsprechen ziemlich gut den Ergebnissen der Modellversuche. Ebenso waren die gemessenen Schwall- und Schiffsneigungen der ersten in die Schleuse einlaufenden Welle auf Grund der Modellversuche in der beobachteten Größenordnung zu erwarten.

4. Schlußfolgerung

Die Modellversuche und die Messungen in der Natur haben eine einfache und offenbar ungefährliche Möglichkeit aufgezeigt, um auf rein hydraulischem Weg durch eine geeignete Kombination von Turbinen-Schwallsteuerung (Bild 6) und Schützabsenkung die bei Netzzusammenbrüchen auftretenden Schwall- und Sunkerscheinungen auf ein unschädliches Maß zu vermindern.

II. Mainstaustufe Gerlachshausen

1. Energiewirtschaftliche Grundlagen [9]

Die am Durchstich der Mainschleife Gerlachshausen-Volkach gelegene Staustufe weicht in ihrer gesamten Anordnung von den übrigen Stautufen des Mains erheblich ab.

Das für die Stauerzeugung notwendige Wehr liegt kurz unterhalb der Abzweigung des Durchstiches vom Main bei Volkach, die Schleuse am unteren Ende des Durchstiches bei Gerlachshausen. Für die im Main übliche Ausbauwassermenge von $110 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt sich am Wehr eine Fallhöhe von 2,45 m, die durch natürliche Eintiefung oder Baggerung noch auf 2,80 m vergrößert werden kann. Dagegen steht in Gerlachshausen bei der gleichen Ausbaugröße eine Fallhöhe von rund 6 m zur Verfügung. Vom energiewirtschaftlichen Standpunkt aus wäre es daher erwünscht gewesen, das Kraftwerk am Ende des Durchstiches bei der Schleuse anzuordnen. Dem stand jedoch entgegen, daß die Anlieger der Mainschleife im Interesse der Bodennutzung eine weitgehende Beibehaltung der natürlichen Wasserführung im Mainbett forderten.

Die endliche, die verschiedenen Nutzungen berücksichtigende Lösung belief in der Mainschleife eine Pflichtwasserführung von mindestens $40 \text{ m}^3/\text{s}$, die nach Abzug der Schleusenverluste an 286 Tagen im Jahr zur Verfügung steht und in einem einturbinigen Kraftwerk genutzt wird. Dabei ist der größte Teil der Mainschleife mit Wasser überdeckt und das Standortklima des Tales bleibt erhalten. Die Ausbaugröße des Kraftwerkes bei Gerlachshausen mit der großen Fallhöhe wurde mit Rücksicht auf die Schifffahrt und die dafür im Kanal zulässigen Wassergeschwindigkeiten auf $50 \text{ m}^3/\text{s}$ beschränkt. Dadurch fällt die Leistungsdauerlinie dieses Kraftwerkes zur Hochwasserseite hin nur langsam ab und hat bei den größten Abflüssen des Mains noch einen Wert von 1500 kW, während die Mehrzahl der übrigen Mainkraftwerke bei diesen Wasserführungen erheblich zurückgehen und manchmal sogar tageweise stillgelegt werden. Die größte Leistung von 2440 kW wird bei 130 Tagen erreicht. Im Hinblick auf den Verbundbetrieb mit den anderen Kraftwerken sind diese Vorteile so groß, daß der Stillstand bei Wasserführungen zwischen 18 und $50 \text{ m}^3/\text{s}$, also während der Niedrigwasserzeit nur eine unbedeutende Rolle spielt.

Für die Zusammenarbeit mit dem Werk am Wehr in Volkach ergibt sich der in Bild 8 dargestellte Werkleistungsplan.

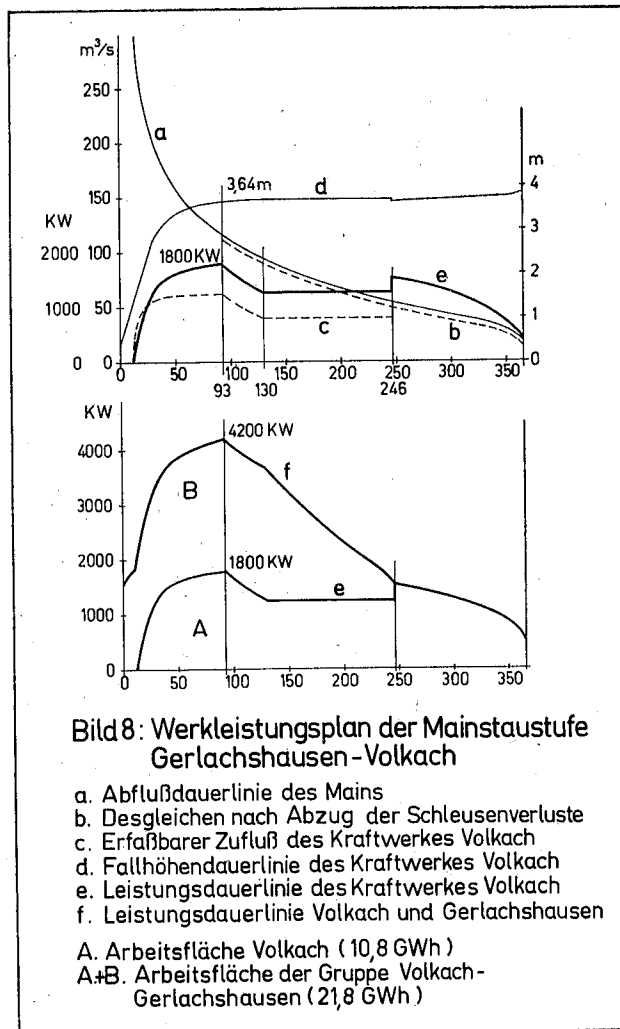


Bild 8 Mainstaustufe Gerlachshausen. Werkleistungsplan.

2. Ergebnisse der wasserbaulichen Modellversuche [10]

(Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe)

Für die Grundrißanordnung des Kraftwerkes Gerlachshausen war der Gedanke maßgebend, Kraftwerk und Schleusen mit möglichst geringem baulichem Aufwand so zu kombinieren, daß sich Schifffahrt und Energieerzeugung gegenseitig nicht behindern.

Bei dem Ausgangsvorschlag war das Kraftwerk von den beiden Schleuseneinfahrten durch Pfeilerköpfe abgetrennt, zwischen denen die Ausbauwassermenge von 50 m³/s der Turbine zugeführt werden sollte. An den beiden Uferseiten schloß sich an die Oberhäupter je eine unter 1:4 gegen die Kammerachse verschwenkte Leitwand an, die nach etwa 40 m in die Böschung 2:3

übergang. Diese Böschungen gingen im Grundriß mit einer leichten Krümmung auf die größte Vorhafenbreite von etwa 85 m über.

Im Modell waren die Baumaßnahmen zu untersuchen, die für eine ungefähre Ein- und Ausfahrt aus der Schleuse bei gleichzeitigem Kraftwerksbetrieb notwendig sind. Für den Ausführungsvorschlag sollten außerdem die Schiffskräfte bei einem Turbinenschnellschluß in 7 sec ermittelt werden.

Bei der vorgegebenen Lage des Kraftwerkes zwischen den Schleusen bedingte der Zufluß der Triebwassermenge zum Krafthaus im oberen Vorhafen sich zunächst widersprechende Strömungsverhältnisse. Das Triebwasser sollte mit möglichst geringen Verlusten dem Kraftwerk zugeführt werden, es durfte jedoch auch der Schiffsverkehr im oberen Vorhafen nicht beeinträchtigt werden. Als besonders gefährdet war hierbei der letzte Kahn eines dreischiffigen Schleppzuges anzusehen, der nach Beobachtungen in der Natur in 100 m Entfernung vom Obertor noch eine Absolutgeschwindigkeit von 0,4 m/s hat. Die Steuerfähigkeit des Kahnens bleibt solange gewahrt, als in allen zeitlichen Phasen des Einfahrens in die Schleusenkammer eine positive Relativgeschwindigkeit zum Erzeugen eines Rudermomentes vorhanden ist. Die Schiffsgeschwindigkeit muß also größer als die Strömungsgeschwindigkeit sein.

Nach Berechnungen und Vorversuchen genügte der Ausgangsvorschlag nicht diesen Bedingungen. Es wurde daher zunächst versucht, unter Beibehaltung der Begrenzung des oberen Vorhafens und nur durch Änderung der Triebwasserzuführung die Einfahrt zu verbessern. Bei sämtlichen untersuchten Abänderungsentwürfen bewirkte der bis auf Schleusenbreite stetig abnehmende Vorhafenquerschnitt eine vergrößerte Strömungsgeschwindigkeit im Einfahrtsbereich. Es mußte jedoch ein Strömungsbild angestrebt werden, bei dem die Strömungsgeschwindigkeit kleiner bleibt als die vorgegebene Schiffsgeschwindigkeit. Die Entnahmestelle des Triebwassers war daher in einen möglichst großen Querschnitt mit geringer Strömungsgeschwindigkeit zu legen. Bei der ursprünglichen Vorhafenform würde dies einen Einlaufschlitz über die gesamte Sohlenbreite etwa 140 oberhalb des Kraftwerkes erfordern. Diese Lösung schied wegen ihres verhältnismäßig großen Bauaufwandes aus.

Einfacher war eine Veränderung des bisherigen Grundrisses in der Art, daß die Querschnittsfläche des oberen Vorhafens in gleichbleibender Größe möglichst nahe an die Oberhäupter und das Kraftwerk herangeführt wird. Dieser Grundriß bietet die Möglichkeit, der Turbine das Triebwasser durch zwei seitliche, außerhalb der Kammerachsen mündende Kanäle von $F = 2 \times (5,4 \times 3,2) = 34,8 \text{ m}^2$ und unmittelbar in der Krafthausachse über den Kanälen mit $F = 2 \times (2,75 \times 5,60) = 30,8 \text{ m}^2$ zuzuführen. Der Mund der seitlichen Einläufe ist nach oben frei. Seine Sohle steigt 1 : 4 auf die Vorhafensohle an. Er dreht sich dabei um 90° unter Verbreiterung seiner Grundfläche in die Anströmrichtung hinein. Die Innenkrümmungen der Kanäle im Bereich des Kraftwerkeinlaufes entsprechen den Krümmungen der Pfeilerköpfe, die in jedem Falle ein gutes Anliegen der Strömung gewährleisten. Der obere und der untere Zulaufquerschnitt sind durch eine horizontale Trennwand, die in Höhe der Vorhafensohle liegt, voneinander getrennt (Bild 13).

Bei dieser Anordnung ließen sich wegen der geringen Werte weder Größe noch Drehrichtung der an einem Schiff wirkenden Momente so einwandfrei erfassen, daß sie als Kriterium für die Anordnung angesehen werden konnten. Als maßgebend wurden daher die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen angesehen, die in Beziehung zur Schiffsgeschwindigkeit gesetzt werden konnten.

Die in Bild 9 wiedergegebenen Geschwindigkeitsmessungen lassen deutlich erkennen, daß das Triebwasser bis 37,5 m oberhalb der Flügelwand auf der ganzen Breite mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,17 m/s zuströmt. Während

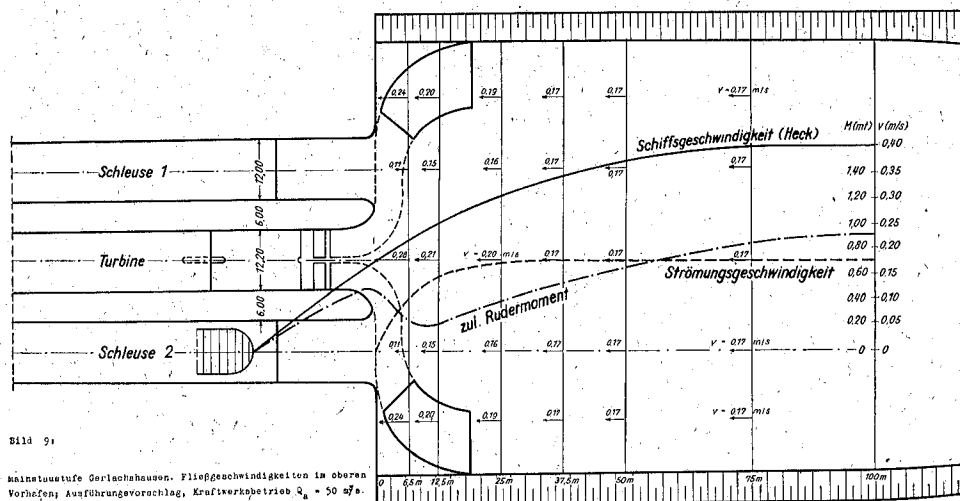


Bild 9

Mainstaustufe Gerlachshausen. Fließgeschwindigkeiten im oberen Vorhafen; Ausführungsvorschlag, Kraftwerksbetrieb $Q_a = 50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Bild 9 Mainstaustufe Gerlachshausen. Fließgeschwindigkeiten im oberen Vorhafen; Ausführungsvorschlag, Kraftwerksbetrieb $Q_a = 50 \text{ m}^3/\text{s}$.

dann in der Kraftwerksachse und über den seitlichen Einläufen die Geschwindigkeiten langsam ansteigen, nehmen sie in den Fahrstraßen stetig ab.

Die aus den Geschwindigkeitsmessungen beobachtete Tendenz wirkt sich auf den Schiffsverkehr günstig aus, da die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der Kammern mit dem Bereich der verminderten Fahrgeschwindigkeit einlaufender Schiffe zusammenfällt. Im gesamten Bereich der Einfahrstrecke verbleibt stets eine positive Relativgeschwindigkeit für ein erzeugbares Rudermoment. Die Strömungsrichtungen sind bis nahe an die Oberhäupter parallel zur Fahrtrichtung der Schiffe. Anschließend geringe Ablenkungen können sich als Drehmoment auf ein einfahrendes Schiff nicht mehr bemerkbar machen.

Bei einem Turbinenschnellschluß in 7 sec breitet sich eine Schwallwelle von ihrem Entstehungsort, dem Kraftwerkseinlauf unmittelbar und durch die seitlichen Einläufe mittelbar nach allen Richtungen der freien Wasserfläche in die Schleuseneinfahrt und kanalaufwärts aus. Die größte Wasserspiegelhebung im Vorhafen wurde in Krafthausachse 10 m oberhalb der Trennpfeilerköpfe mit 12,5 cm gemessen. Im übrigen Bereich stieg der Wasserspiegel kaum über 10 cm an.

Unter den gleichen Versuchsbedingungen wurden die auf einen naturähnlichen 1000-t-Kahn wirkenden Kräfte gemessen. Die Versuche zeigten deutlich, daß selbst scheinbar geringfügige Schwallhöhen durch die Neigung von Wasserspiegel und Schiff recht beachtliche Schiffskräfte hervorrufen. Die verschiedenen untersuchten Schiffslagen und die zugehörigen Meßkurven sind in Bild 10 dargestellt.

Die größten Schiffskräfte wurden in Lage II (Bug 40 m oberhalb des Oberhauptes) durch den am Untertor reflektierten Schwall erzeugt. Da die Lauf-

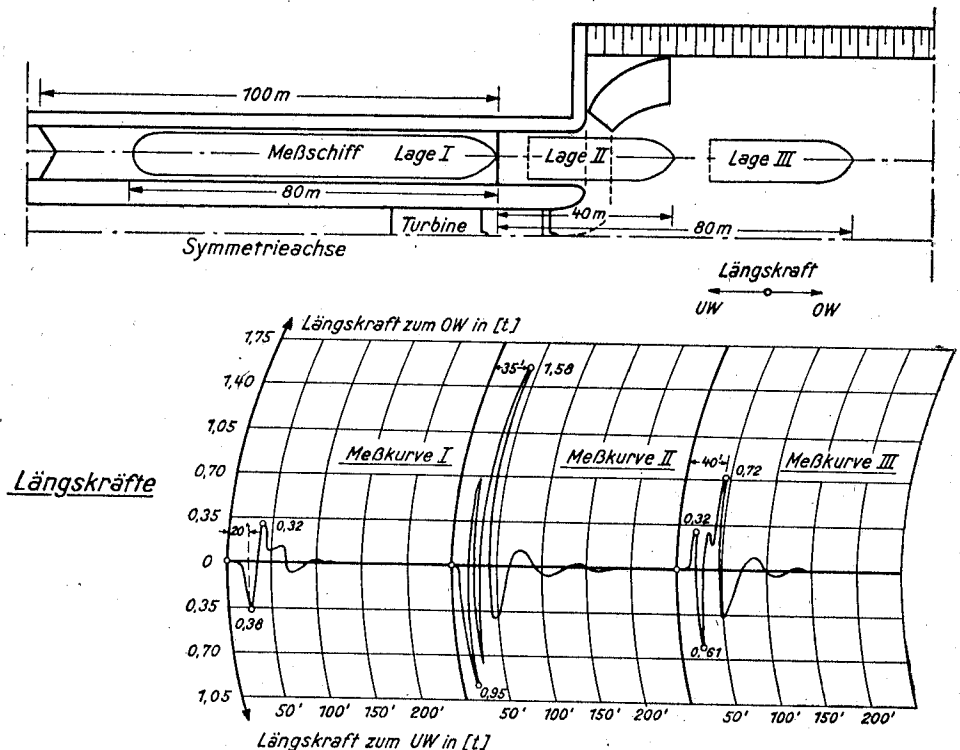


Bild 10 Mainstaustufe Gerlachshausen. Schiffskräfte für verschiedene Schiffslagen bei Turbinenschnellschluß.

geschwindigkeit des Schalles in der Kammer infolge der Wassertiefe größer ist als im Vorhafen, trifft der Reflexionsschall bei einem ausfahrenden Schiff (Lage II) zu einer Zeit ein, zu der der Ausgleich zwischen der Schwallausbreitung von den mittleren und seitlichen Triebwasserzuläufen noch nicht beendet ist.

Die gemessene Schiffs kraft von 1,58 t liegt knapp unterhalb der zulässigen Grenze und könnte sich deshalb bei einem ausfahrenden Schleppzug bemerkbar machen. Sie bedeutet jedoch keine Gefährdung oder Störung des Schiffs fahrts betriebes.

3. Versuchsergebnisse der Fa. Voith, Heidenheim [11]

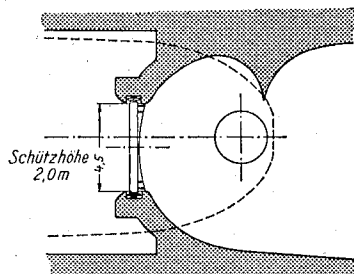
Bei den Untersuchungen der Fa. Voith sollte festgestellt werden, ob es möglich ist, beim plötzlichen Abschalten der Maschine die Turbinenwassermenge über einen Nebenauslaß zu leiten und damit den Durchfluß bei abgestellter Maschine aufrechtzuerhalten. Dabei sollten die Vor- und Nachteile von verschiedenen Anordnungen eines Nebenauslasses und die dafür nötigen Einbauten zur Energievernichtung untersucht und Unterlagen für eine Baukostenschätzung gewonnen werden.

Da die Untersuchungen des Flußbaulaboratoriums Karlsruhe gezeigt hatten, daß die bei der Abschaltung auftretenden Schwall- und Sunkwellen die Schifffahrt zwar nicht stören, aber doch beeinflussen könnten, war in einer weiteren Versuchsreihe zu untersuchen, welche Anordnung in dieser Hinsicht die größten Vorteile bietet. Hierfür wurden nur die Schwall- und Sunkwellen in Krafthausnähe gemessen und nicht der Einfluß auf die Schifffahrt selbst.

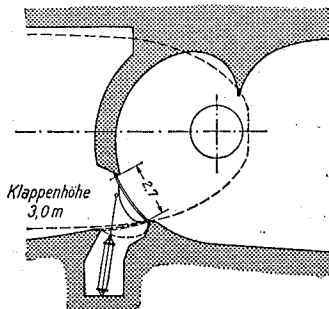
Am Modell der Firma Voith, Heidenheim, im Maßstab 1 : 30 wurden folgende 4 Vorschläge untersucht: (Bild 11)

1. Schütz in Spiralmitte (Vorschlag 1, Bild 11),
2. Schütz auf der offenen Spiralseite,
3. Klappe mit senkrechter Welle in der Turbinenspirale (Vorschlag 3, Bild 11),
4. Horizontale Drehklappe über dem Einlauf (Vorschlag 4, Bild 11).

Vorschlag 1: Turbine mit Nebenauslaß als Schütze in Spiralmitte



Vorschlag 3: Turbine mit Nebenauslaß als Klappe mit vertikaler Welle



Vorschlag 4: Turbine mit Nebenauslaß als Klappe mit horizontaler Welle

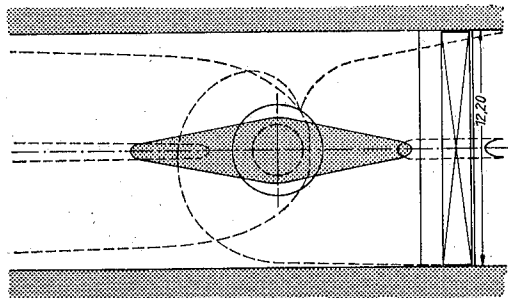
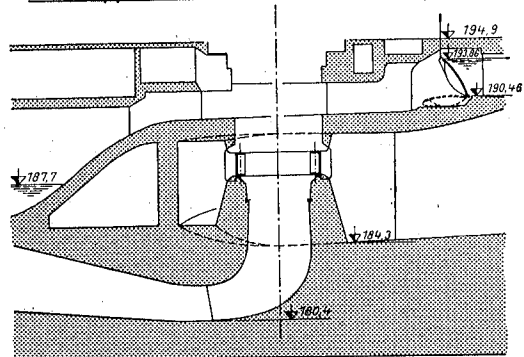


Bild 11 Mainstaustufe Gerlachshausen. Im Modell untersuchte Entlastungsanlagen.

Mit Ausnahme von Vorschlag 2 mit seitlicher Schützöffnung wurden bei allen Versuchen verschiedenen konstanten Leitradschließzeiten (11, 14, 16,5, 19 und 27,5 sec) in mehrfachen Variationen verschiedene Öffnungszeiten des Nebenauslasses zugeordnet und die entstehenden Schwall- und Sunkhöhen gemessen. Zusätzlich wurden noch Versuche ausgeführt, bei denen die Kaplan-Turbine als Propellerturbine abgeschaltet wurde. Für diesen Fall konnte man annehmen, daß nach Abschaltung der Turbine noch 50 % der Vollwassermenge, also etwa 25 m³/s bei Normaldrehzahl abgeführt werden können. Die Beanspruchung des Bauwerks durch die dabei notwendige Energieumwandlung wurde dabei nicht untersucht.

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die Vor- und Nachteile der einzelnen Vorschläge gegeben:

Vorschlag 1: Mit Rücksicht auf eine geringe Schwall- und Sunkbildung beim Abschaltvorgang muß das Schütz breit sein, damit bereits bei geringer Hubhöhe eine größere Wassermenge abgeleitet werden kann. In hydraulischer Hinsicht wirkt sich diese Forderung ungünstig aus, da damit die Höhe des geöffneten Schützes geringer wird und entlang der über dem Schütz befindlichen Spiralwand eine größere Wassermenge strömt, die in Spornnähe unter großer Wirbelbildung nach dem Schütz umgelenkt werden muß. Die Auswirkungen auf die Turbine und die Erschütterung auf das Bauwerk konnten bei dem vorliegenden Modellmaßstab nicht erfaßt werden. In gleicher Weise wird der Betrieb bei Abschaltung mit erhöhter Leerlaufwassermenge, der Schwall und Sunk günstig beeinflussen würde, kritisch, da durch das geöffnete Schütz das Leitrad sehr ungleichmäßig beaufschlagt wird. Dadurch werden wiederum zusätzliche Wirbelbildungen angeregt, die in einem Zusammenwirken mit der Energieumwandlung im Saugrohr die Beanspruchung des Bauwerks erhöhen.

Vorschlag 2: Bei dieser Anordnung müssen die Abmessungen des Schützes bei gleichem Querschnitt quadratisch gewählt werden. Die größere Schützhöhe wirkt sich dabei in hydraulischer Hinsicht günstiger aus. Der Vorschlag ist aber wegen der größeren Schwall- und Sunkhöhen gegenüber Vorschlag 1 nicht zu empfehlen.

Vorschlag 3: Die Querschnitte der Klappe können gegenüber der Schütz-anordnung etwas vermindert werden, da die Öffnung strömungstechnisch günstiger liegt. Die Beanspruchung der Turbine ist wahrscheinlich geringer als bei den Schützen. Bei der Ausführung lassen sich vermutlich auch kürzere Öffnungszeiten erreichen als bei einem Schütz, da die Klappe durch den Wasserdruck selbsttätig öffnet. In konstruktiver Hinsicht wird die Abdichtung und die Freihaltung des unterwasserseitigen, von der Klappe überfahrenen Raumes Schwierigkeiten bereiten.

Vorschlag 4: Die Lösung mit einer horizontalen Klappe bringt zwar in bezug auf die notwendige tiefere Gründung der Turbinenanlage Nachteile, jedoch ist eine Regulierung mit übersichtlichen Maschinenelementen ohne Störung des Turbinenbetriebes möglich.

Zur Energieumwandlung wird für die Anordnungen 1 bis 3 eine Tauchwand hinter der Saugschlauchdecke vorgeschlagen, auf die bei Wahl der Anordnung 4 unter Umständen verzichtet werden kann.

In hydraulischer Hinsicht ist Vorschlag 4 mit einer über dem Einlauf liegenden Drehklappe vorzuziehen, da hierbei der normale Turbinenbetrieb und damit die Betriebssicherheit der Turbine in keiner Weise beeinträchtigt wird. Sofern man auf eine Öffnung in der Turbinenspirale zurückgreifen will, ist in hydraulischer Hinsicht die Anordnung 3 — Drehklappe mit vertikaler Welle — vorzuziehen, da der damit verbundene Nachteil bei der Energieumwandlung geringer wiegt als die mit den anderen Spiralenöffnungen verbundene größere Beanspruchung der Turbine.

Für die Beurteilung der günstigsten Gesamtanordnung sind jedoch nicht allein die hydraulischen Verhältnisse maßgebend, sondern auch die dabei vorhandenen Einflüsse auf die Schwall- und Sunkhöhen. Bild 12 gibt für die 3 charakteristischen Vorschläge einen Überblick über die Meßwerte bei gleichen Versuchsbedingungen. Daraus ist zu ersehen, daß die Anordnung mit horizontaler Drehklappe die günstigsten Ergebnisse liefert. Allerdings ist bei der Beurteilung zu fragen, ob es überhaupt gelingt, in der Großausführung den Nebenauslaß in der verhältnismäßig kurzen Zeit von 15 bis 28 sec zu öffnen.

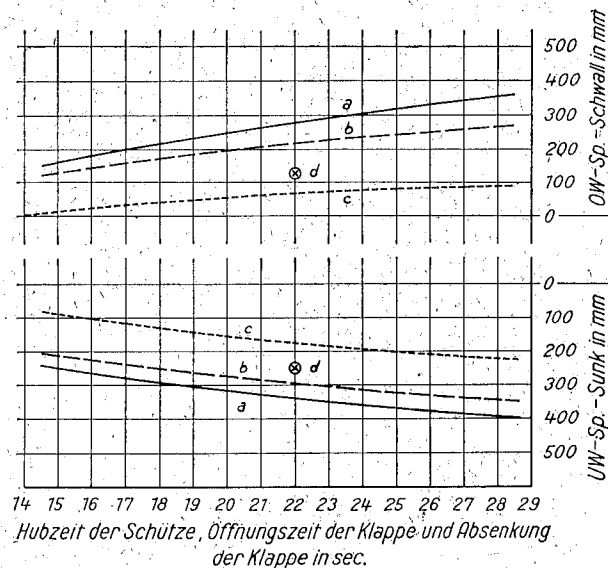


Bild 12 Mainstaustufe Gerlachshausen. Schwall- und Sunkvergleich bei den drei verschiedenen Anordnungen in Abhängigkeit von der Verschlussbewegung in sec.

- a) Schütz in Spiralmitte, Schaltverzögerung 3 sec.
- b) Klappe mit vertikaler Welle, Schaltverzögerung 5,5 sec.
- c) Klappe mit horizontaler Welle, Schaltverzögerung 0 sec.
- d) Klappe mit horizontaler Welle, Schaltverzögerung 5,5 sec.

Leitradschließzeit konstant 16,5 sec.

4. Bauausführung [9]

Bei der Bauausführung wurde die aus den Modellversuchen ermittelte Grundrißgestaltung im wesentlichen beibehalten (Bild 13 und 14).

Das Kraftwerk liegt zwischen der vor der Vollendung stehenden Westschleuse und der später zu errichtenden Ostschleuse nahe bei den Oberhäuptern, so daß die Kammer- und Häuptermauern zur seitlichen Einfassung des Werkgebäudes dienen. Um vom Schleusensteuerhaus aus die Übersicht nicht zu behindern, wurde auf ein Maschinenhaus verzichtet und die Flachbauweise mit Außenkran gewählt. Der Maschinensatz, bestehend aus Kaplanturbine und direkt gekoppeltem Asynchrongenerator wird durch eine Blechhaube abgedeckt. Der Transformator und der Leitungsabzweig für 20 kV mit Meßwandlern und Schutzrichtungen sind in Freiluftausführung auf der Unterstromseite des Kraftwerkes so tief eingebaut, daß die Höhe der Schleusenmauer nicht überschritten wird.

Da die beiden Werke Volkach und Gerlachshausen wasser- und energiewirtschaftlich eine Einheit darstellen, können sie auch als ein Werk mit zwei räumlich getrennten Maschinensätzen angesehen werden. Der Umstand, daß Gerlachshausen im Regeljahr 119 Tage, im Trockenjahr 215 Tage stillsteht, sprach dafür, die gemeinsame Betriebsführung nach Volkach zu legen und das Kraftwerk Gerlachshausen durch Fernsteuerung zu bedienen.

Auf den Einbau einer Entlastungsanlage für den Fall des Turbinenschnellschlusses wurde verzichtet, da er sich als ziemlich kostspielig herausstellte und angesichts der Schwallkräfte von 0,38 t auf einen in der Schleuse liegenden Schleppkahn und von 1,58 t auf einen ausfahrenden Schleppkahn nicht zwingend notwendig war.

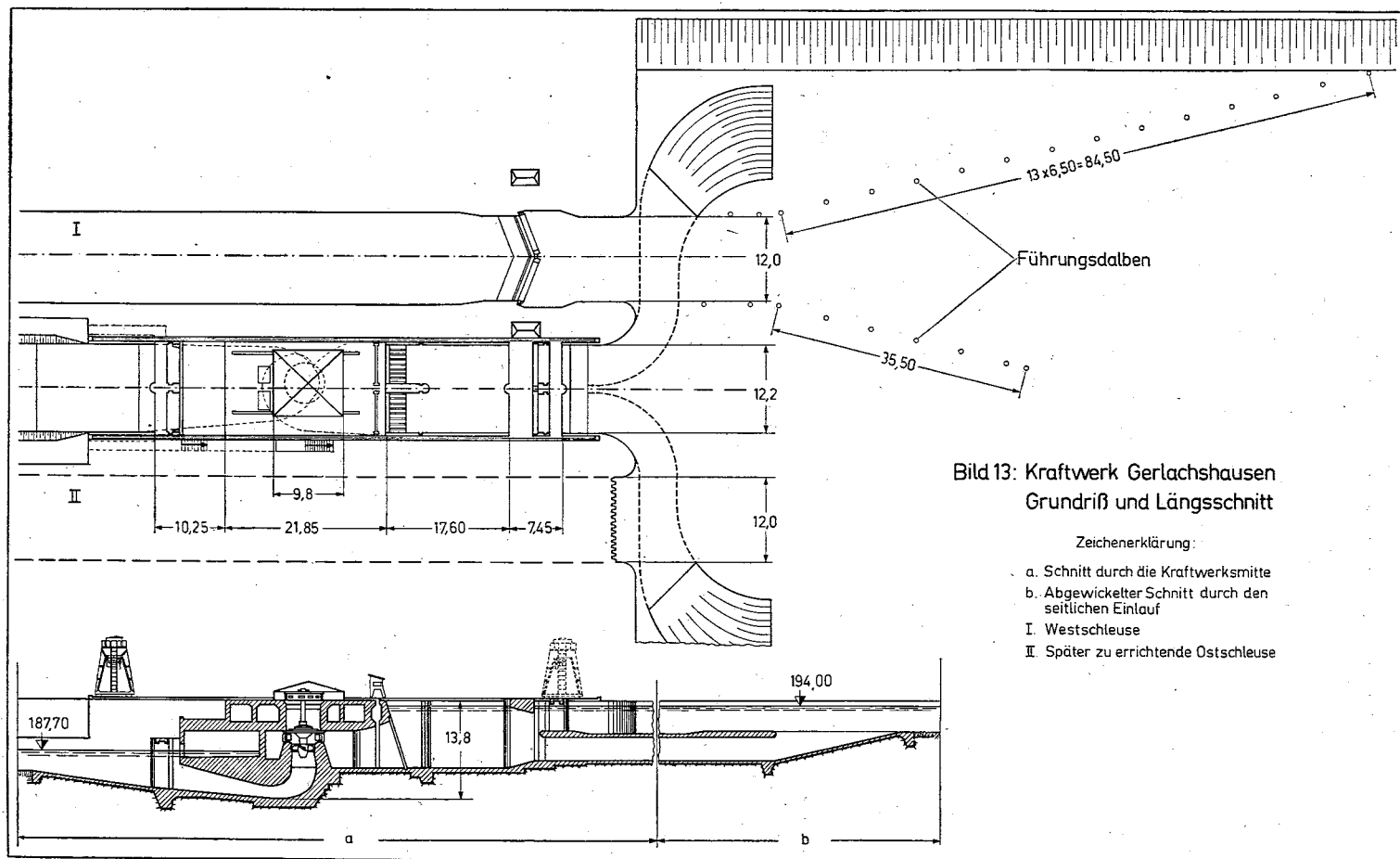


Bild 13 Kraftwerk Gerlachshausen. Grundriß und Längsschnitt.



Bild 14 Schleuse und Kraftwerk der Mainstaustufe Gerlachshausen. Bauzustand im September 1956.