

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 99/100 (1932)
Heft: 5

Artikel: Ueber die Eigenschaften von Schwällen und die Berechnung von Unterwasserstollen
Autor: Meyer-Peter, E. / Favre, Henry
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-45536>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

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

genügt aber nicht, um die Reichsbahn voll wettbewerbsfähig zu machen; sie muss dem Verkehrtreibenden gleiche Vorteile wie der Kraftwagen in der Haus-Hausbeförderung bieten können. Dazu wurde von der Reichsbahn die „Deutsche Bahnspedition G. m. b. H.“ geschaffen. Sie arbeitet unter Benutzung der Erfahrungen und Einrichtungen der grossen Speditionsfirma Schenker & Co. und der zu ihrem Konzern gehörigen Firmen. Die Aufgaben der Deutschen Bahnspedition regelt der „Bahnspeditions-Vertrag“ vom 6. Dezember 1931, durch den auch die Firma Schenker mit den angeschlossenen Firmen verpflichtet ist. Der Vertrag regelt die An- und Abfuhr zwischen Bahnhof und den Verkehrtreibenden, den Haus-Haus-Verkehr von der Wohnung des Absenders zur Wohnung des Empfängers zu einem durchgehenden Frachtsatz, den Sammel- und Behälterverkehr, den Zubringerdienst von Orten abseits der Schiene, die Einrichtung von Verkehrsagenturen der Reichsbahn, die Verkehrswerbung und die Einrichtung und Bedienung von Güterannahmestellen. Die Deutsche Bahnspedition übernimmt den Rollfuhrdienst nur dort selbst, wo die Reichsbahn einen geeigneten anderen zu billigen Sätzen fahrenden Unternehmer nicht findet. Für die Rollgebühren werden fürs ganze Reichsbahngebiet einheitliche

Höchstsätze festgelegt, die weit unter den bisherigen durchschnittlichen Unternehmersätzen liegen. An Orten, an denen durch die Vereinheitlichung eine Erniedrigung der Rollsätze eintritt, gewährleistet die Reichsbahn den bahnamtlichen Unternehmern die Selbstkosten und einen angemessenen Nutzzuschlag. Grundgedanke des Vertrages war die Zusammenfassung und damit die Verbilligung des Rollfuhr- und Speditions geschäfts. Die Absicht wurde aber durch das Zusatzabkommen mit den Auftragspediteuren zum Teil durchkreuzt. Dieses Zusatzabkommen, zu dem sich die Reichsbahn durch den Druck der Vereinigungen freier Spediteure veranlasst sah, bestimmt, dass auch die Auftragspediteure dort Zuschüsse erhalten, wo solche an die bahnamtlichen Rollfuhrunternehmer gezahlt werden.

Auf jeden Fall aber bedeutet der Bahnspeditionsvertrag eine Ueberbrückung der Lücke zwischen Bahnhof und Wohnung durch Einspannung des Kraftwagens in den Dienst der Reichsbahn. Damit ist ein wirklicher Fortschritt erreicht. Der einheitliche, stark verbilligte Gebührentarif und die Möglichkeit, unmittelbar von Haus zu Haus aufzugeben, wirkt stark verkehrswerbend. Die Einführung der Neuerung erfolgte am 1. März 1932, sodass ein abschliessendes Urteil noch nicht möglich ist.

Ueber die Eigenschaften von Schwällen und die Berechnung von Unterwasserstollen.

Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau an der E. T. H. Von Prof. E. MEYER-PETER und Dr. HENRY FAVRE. (Schluss von S. 50.)

II. MODELLVERSUCHE FÜR DEN UNTERWASSERSTOLLEN DES KRAFTWERKES WETTINGEN.

Die Gesamtanordnung des Werkes, mit dem Lageplan der Limmat, dem Stauwehr, dem Maschinenhaus und dem Unterwasserstollen ist aus Abb. 11 ersichtlich.¹⁾ Das

¹⁾ Vergl. „S. B. Z.“ Bd. 95, Seite 233* (3. Mai 1930).

den Berechnungen und Versuchen zu Grunde gelegte Stollenprofil ergibt sich aus Abb. 12, in der die Betriebswasserspiegel beim Stollenauslauf für eine totale Wassermenge (Limmat plus Stollen) von 42, 120, 300, 500 m³/sec eingezeichnet sind. In Abb. 13 ist das Längenprofil des Stollens, sowie die Grundrissfläche des Wasserschlosses dargestellt.

Die Abb. 14 bis 18 zeigen die Anordnung des Modells, das im Masstab 1:30 ausgeführt wurde. In Abb. 14 ist das Gesamtmodell sichtbar, im Vordergrund die Limmat und der Stollenauslauf, im Hintergrund der Stollen und die Wasserschlosskammer. Aus Rücksicht auf den zur Verfügung stehenden Raum wurde das Modell als Spiegelbild der Wirklichkeit ausgeführt. Vom Maschinenhaus wurden nur die Saugkrümmen der drei Kaplan turbinen modellähnlich erstellt. Die Turbinen wurden ersetzt durch Energievernichter in Form durchlochter Platten, die direkt oberhalb der Saugkrümmen eingebaut waren. Bei dem zu behandelnden Problem kam es ja nur darauf an, die einem bestimmten Betriebszustand entsprechende Wassermenge der Turbinen in möglichst gleicher Weise in die Wasserkammer einzuleiten, wie

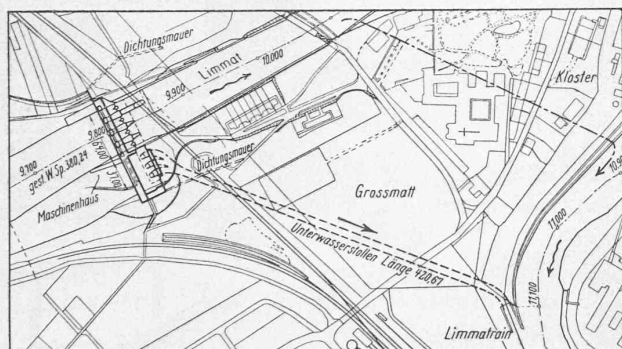


Abb. 11. Lageplan des Kraftwerkes Wettingen. — Masstab 1 : 8000.

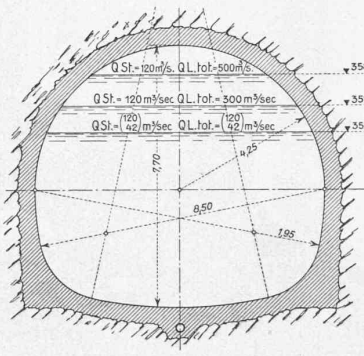


Abb. 12. Normalprofil des Unterwasserstollens; Wasserspiegel bei Hm. 4,5692. — 1 : 200.

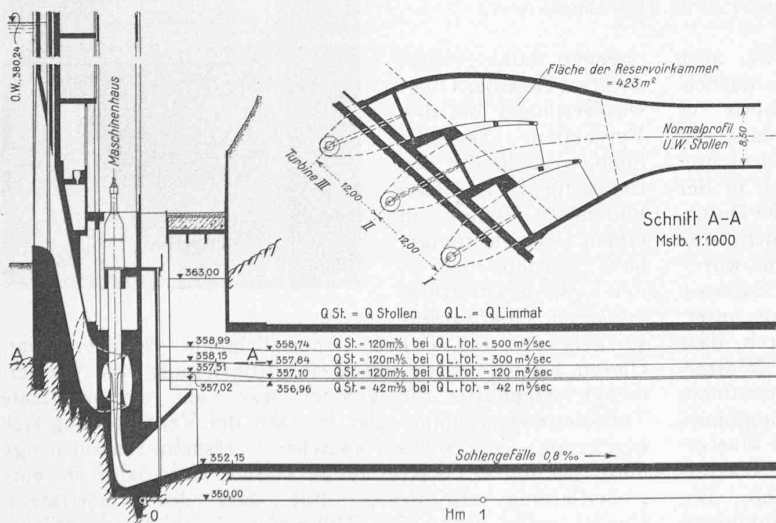
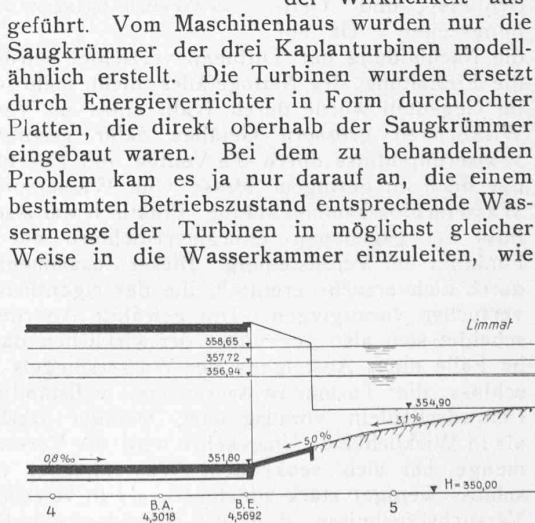
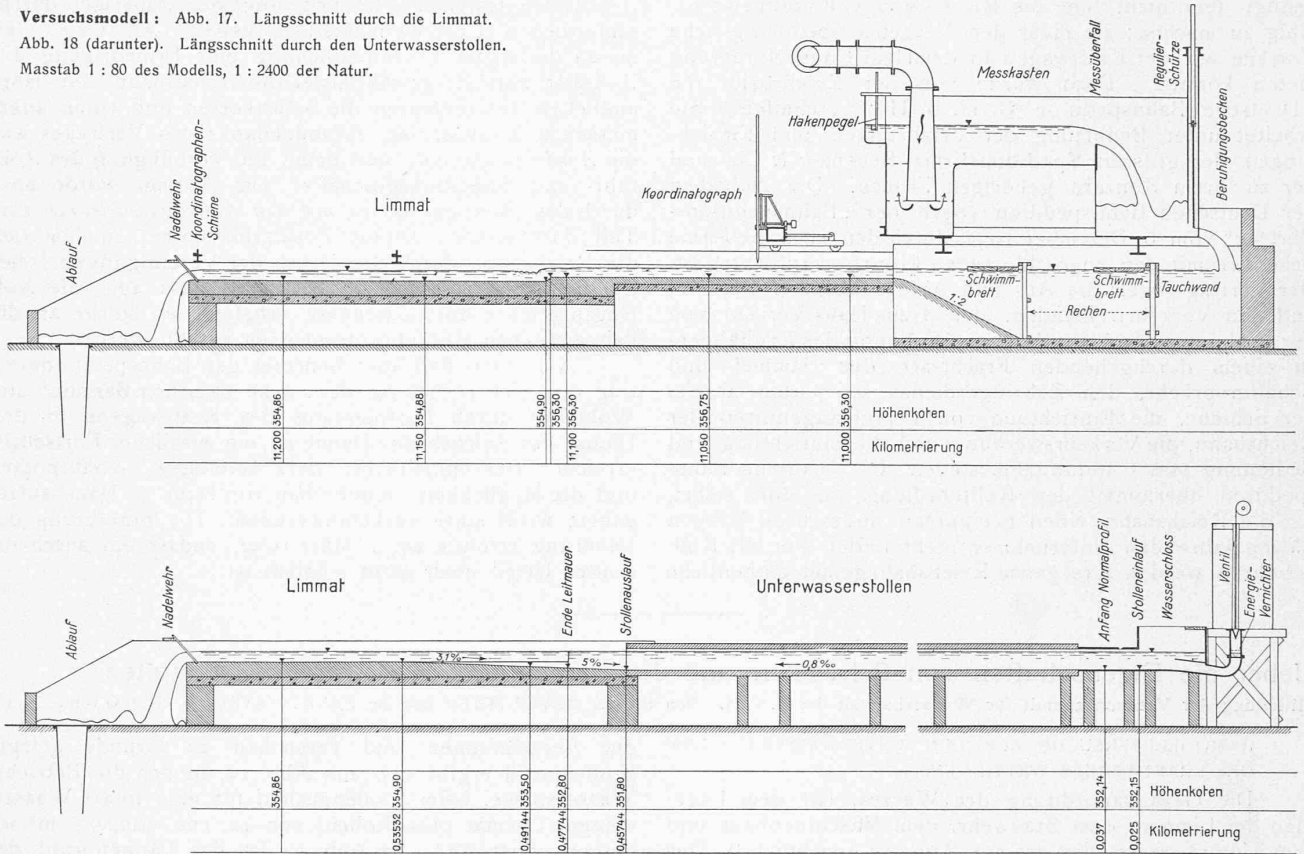


Abb. 13. Längenprofil des Unterwasserstollens (Längen 1 : 2000, Höhen 1 : 400) und Schnitt durch die Reservoirkammer (1 : 1000). (Abb. 11 nach Zeichn. der „Bautechnik“.)



Versuchsmodell: Abb. 17. Längsschnitt durch die Limmat.
Abb. 18 (darunter). Längsschnitt durch den Unterwasserstollen.
Masstab 1 : 80 des Modells, 1 : 2400 der Natur.



dies in Wirklichkeit der Fall ist. An Stelle der Leitschaufeln der Turbinen wurden drei vertikale Zylinderventile (Abb. 18) eingebaut, die durch einen Servomotor, der in Abb. 15 sichtbar ist, nach beliebigen Vorschriften linear mit der Zeit bewegt werden konnten. Insbesondere erlaubte der Servomotor die Einhaltung beliebiger Öffnungsgrade und beliebiger Schliess- und Öffnungszeiten. Da auf die Nachbildung der Turbinen verzichtet wurde, war auch die Einhaltung des Nettogefälles nicht mehr erforderlich. Im Gegenteil wurde durch Wahl eines im Verhältnis zur Wirklichkeit grösseren Gefälles dafür gesorgt, dass der Wasserdurchfluss durch die Ventile und Energievernichter nur noch in geringem Masse vom Wasserspiegel in der Wasserschlosskammer abhing. Praktisch war also der Durchfluss bei gegebenen Energievernichtern nur noch eine Funktion der Ventilstellung. Dieser Zusammenhang wurde durch Eichversuche ermittelt, die den eigentlichen Schwallversuchen vorangingen. Die gewählte Anordnung unterscheidet sich also gegenüber der wirklichen dadurch, dass im Falle eines Anstiegs des Wasserspiegels im Wasserschloss die Turbinenwassermenge, vollständig geöffnete Leitrad-schaufeln vorausgesetzt, weniger stark abnimmt, als in Wirklichkeit. Umgekehrt wird die Versuchs-Wassermenge bei sich senkendem Wasserspiegel im Wasserschloss weniger stark zunehmen, als in Wirklichkeit. Die Versuchsergebnisse, d. h. die Wasserspiegelschwankungen werden also etwas ungünstiger als in der Natur. Es musste

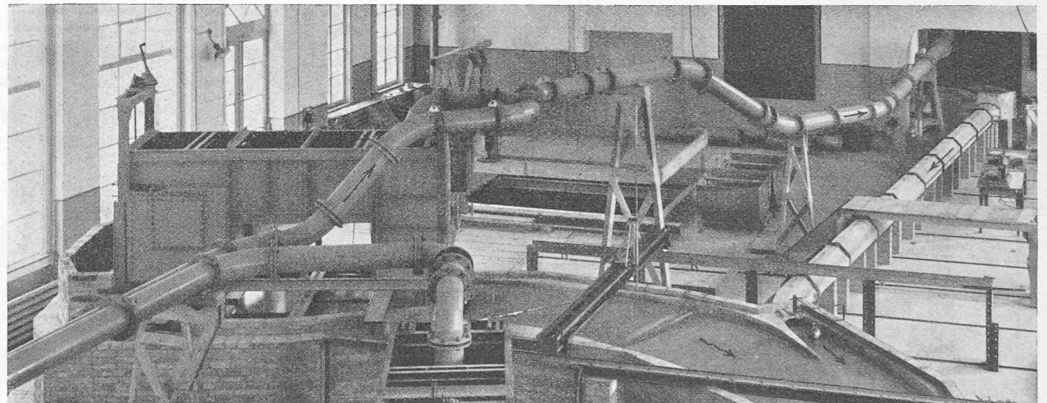
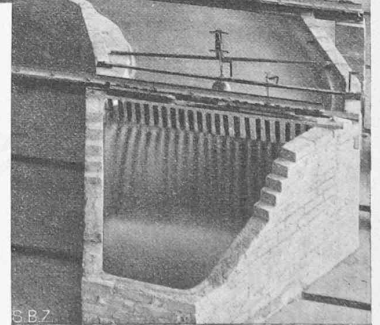


Abb. 14. Gesamtansicht des Modells (Spiegelbild der Natur); im Vordergrund die Limmat, im Hintergrund der Stollen und die Wasserschlosskammer.

dagegen dafür gesorgt werden, dass der Oberwasserspiegel bei den Versuchen konstant blieb, weshalb die den Ersatz für die Turbinen bildenden Ventile in einem Kasten eingebaut wurden, der in der Höhe des betriebsmässigen Oberwasserspiegels mit zahlreichen Ueberfallrinnen versehen war. Diesem Kasten wurde durch eine Rohrleitung eine Wassermenge zugeführt, die grösser war, als die maximale Turbinenwassermenge. Der je nach der Ventilstellung sich ergebende Ueberschuss zwischen Versuchs-Wassermenge und zugeführter Wassermenge konnte sich dann in eine Ablaufleitung ergiessen, ohne dass der Oberwasserspiegel mehr als einige Millimeter durch die Ventilstellungen beeinflusst war.



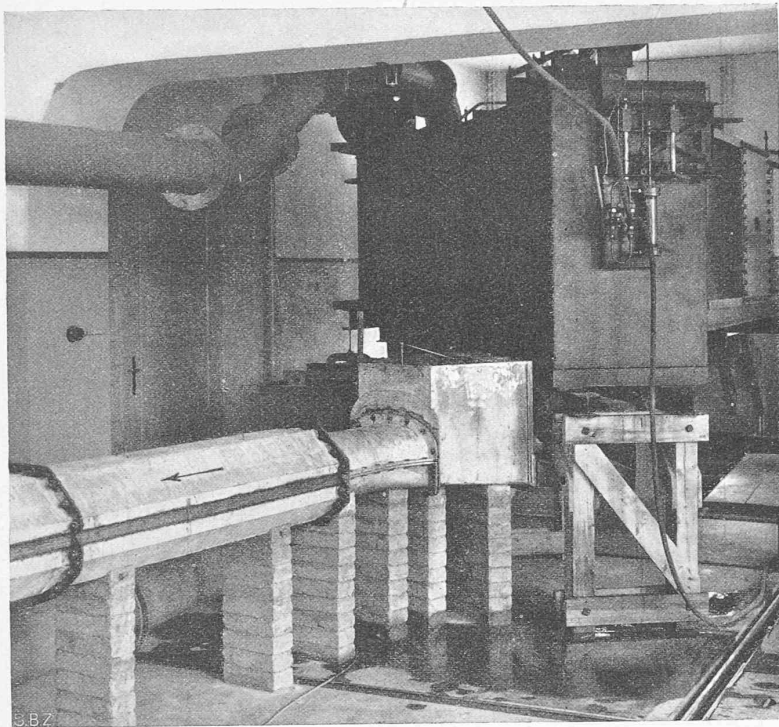
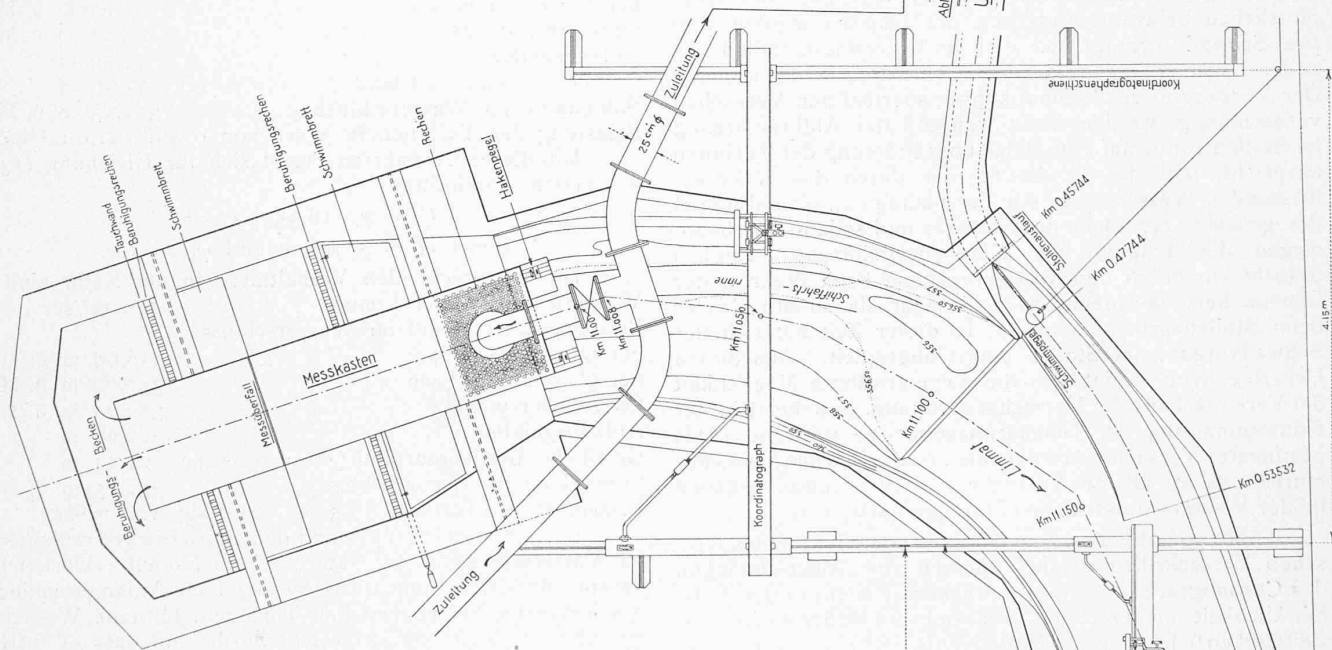
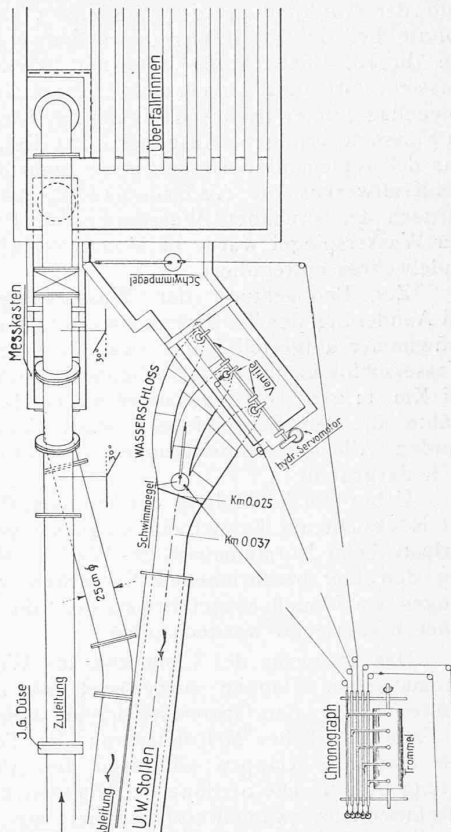


Abb. 15. Oberer Teil des Modells; Maschinenhaus, Wasserschloss, Stollen, Servomotor.



Die durch die Turbinen absorbierten Wassermengen wurden gemessen als Differenz zwischen der dem Kasten zugeführten Wassermenge, die durch eine J. G. Messdüse ermittelt wurde, und der in einem Messkasten mit Bazin-Ueberfall ermittelten Ueberlaufwassermenge. Die vorhin erwähnten Eichungen der Ventilstellungen wurden mit Hilfe dieser beiden Apparate für zahlreiche Beharrungszustände durchgeführt. Die Einstellung des Servomotors erfolgte jeweils für einen bestimmten Versuch derart, dass die Ventile sich auf jene Hubhöhe öffneten, die beim Beharrungszustand im Stollen die gewünschte Wassermenge lieferte.

Da die Versuche für verschiedene, von der Wasserführung der Limmat abhängige Wasserstände beim Stollenauslauf durchzuführen waren, musste eine zweite Wassermesseinrichtung, in Form eines Messkastens mit Messüberfall (Abb. 16 u. 17), für die Bestimmung der Limmatwassermenge angeordnet werden. Für jede Limmatwassermenge ist in der Natur ein bestimmter Wasserspiegel gegeben, der als Grundlage der Modellversuche bekannt sein muss. Da mit dem Bau des Werkes Ausbaggerungen des Limmatbettes unter-

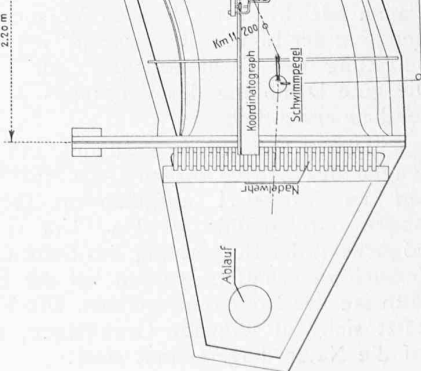


Abb. 16. Grundriss des Modells; Masstab 1 : 60 des Modells, 1 : 1800 der Natur.

halb der Ausmündung des Stollens verbunden sind, so konnte bei der Ermittlung dieser Wasserstände nicht auf die direkte Beobachtung abgestellt werden, sondern es mussten, vorgängig der Versuche, Berechnungen der Wasserspiegellage, unter Berücksichtigung der Korrekturen der Wasserspiegellage, unter Berücksichtigung der Korrekturen der Wasserspiegellage, erfolgen. Ausgangspunkt dieser Berechnungen war der reglementarisch bestimmte Stauspiegel beim Wehr des Kraftwerkes Aue. Als Grundlage für die Versuche diente darnach der berechnete Wasserstand im Profil Km. 11,216. Der Wasserspiegel wurde im Modellversuch mit Hilfe eines Nadelwehres einreguliert.

Zur Beobachtung der Wasserspiegelschwankungen bei Aenderung der Turbinenwassermenge wurden nun vier Schwimmer aufgestellt, und zwar im Oberwasser, in der Wasserschlosskammer, am Stollenauslauf und in der Limmat bei Km. 11,216. Die Schwimmer waren durch feine Stahldrähte mit den Schreibfedern eines Chronographen verbunden. Alle diese Einrichtungen sind in Abb. 16 schematisch dargestellt.

Ueber die Ausbildung des Stollenauslaufes, besonders mit Rücksicht auf Erreichung möglichst geringer Energieverluste beim Normalbetrieb des Werkes, sind, unabhängig von den hier beschriebenen Versuchen, besondere Erhebungen am Modell ausgeführt worden, die aber hier nicht näher beschrieben werden sollen.

Das Stauwehr des Limmatwerkes Wettingen ist mit automatischen Klappen ausgerüstet, die die Aufgabe zu erfüllen haben, den Oberwasserspiegel konstant zu halten. Im Falle plötzlicher Mehrbelastung der Turbinen müssen sich also die Klappen schliessen, bei Abnahme der Belastung öffnen. Die Stellung der Klappen kann ferner vom Maschinenhaus zwangsweise reguliert werden. Bei einer plötzlichen Belastungsänderung der Zentrale werden also zwei Schwälle erzeugt, der eine im Unterwasserstollen, der andere, von entgegengesetztem Charakter, in der Limmat. Der Vorgang in der Limmat konnte aber bei den Versuchen vernachlässigt werden, denn während der Abflussvorgang im Stollen sofort auf eine Belastungsänderung der Turbinen anspricht, tritt die Aenderung der durch das Wehr abfließenden Wassermenge mit Verspätung ein, einmal wegen der grossen Oberfläche des Stausees und sodann überhaupt wegen der Trägheit der Klappenregulierung. Endlich braucht ein durch den Reguliervorgang beim Wehr in der Limmat hervorgerufener Schwall mehr als 10 min, bis er beim Stollenauslauf ankommt. In dieser Zeit hat sich der Schwallvorgang im Stollen längst abgespielt. Aus diesen Ueberlegungen ergibt sich die eben erwähnte Möglichkeit der Vereinfachung der Versuchsanordnung, bestehend in der Konstanthaltung der Limmatwassermenge während eines bestimmten Versuchs. Mit der oben beschriebenen Versuchseinrichtung wurden die Versuche über die Schwallvorgänge in der Wasserschlosskammer durchgeführt.

Abb. 19 gibt eine vollständige Darstellung eines typischen Versuchsdiagrammes, nämlich die Aufzeichnungen des Chronographen. Die eingetragenen Zeiten sind auf die Wirklichkeit umgerechnet, während die Einzelstufen der Zeitmarken¹⁾ je 1 sec im Modell entsprechen. Dieses Diagramm bezieht sich auf einen Versuch mit einer Wassermenge in der Limmat von 500 m³/sec und einer plötzlichen Belastung der Turbinen von 0 auf 120 m³/sec in 5 sec. Die gute Dämpfung des Vorganges ist aus dem Diagramm deutlich ersichtlich.

Dieser Fall wurde auch den zahlenmässigen Berechnungen des Schwallvorganges zugrunde gelegt, die gemäss den im Kapitel I ausgeführten theoretischen Betrachtungen durchgeführt wurden. Um eine gute Vergleichsmöglichkeit der Berechnung des Schwallvorganges mit dem Versuch zu erhalten, wurden bei der Berechnung die Verhältnisse des Modells eingeführt. Die Vergleichsberechnung stützt sich auf folgende Grundlagen, wobei alle Angaben auf die Natur umgerechnet sind:

¹⁾ Diese Zeitmarken konnten in der Verkleinerung der Originaldiagramme Abb. 19 und 22 bis 24 nicht wiedergegeben werden. Red.

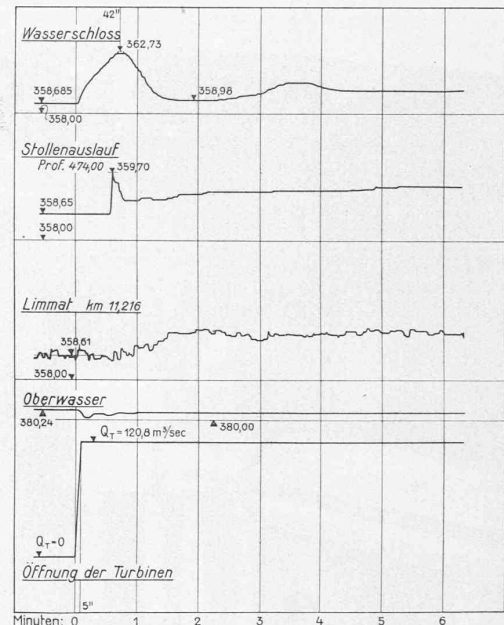


Abb. 19. Diagramm eines Schwallversuches. Öffnen der Turbinen von 0 auf 120 m³/sec in 5 sec bei Q_{Limmat} = 500 m³/sec. (Versuch 3a.)

Wassermenge der Limmat	500 m ³ /sec
Betriebswasserspiegel im Wasserschloss	
bei Q = 120 m ³ /sec	359,85 m ü. M.
bei Q = 0 m ³ /sec	358,68 m ü. M.
Oberwasserspiegel	403,21 m ü. M.
Anfangsgefälle	44,53 m
Gefälle bei Betriebszustand Q = 120 m ³ /sec	43,36 m
Sohlenkote im Wasserschloss	352,15 m ü. M.
Belastung der Turbinen in 5 sec von 0 auf 121,0 m ³ /sec.	

Mit diesen Annahmen ergibt sich für Gleichung (13) des ersten Abschnittes:

$$Q_i' = \psi_i \cdot 18,35 \sqrt{H-z}$$

wobei H = 51,06 m und $\psi_i = 1,0$.

Die entsprechenden Verhältnisse in der Natur sind:

Wassermenge in der Limmat	500 m ³ /sec
Betriebswasserspiegel im Wasserschloss	
bei Q = 120 m ³ /sec	358,99 m ü. M.
bei Q = 0 m ³ /sec	358,60 m ü. M.
Oberwasserspiegel	380,24 m ü. M.
Anfangsgefälle	21,64 m
Gefälle bei Betriebszustand Q = 120 m ³ /sec	21,25 m
Sohlenkote im Wasserschloss	352,15 m ü. M.
Belastung der Turbinen in 5 sec von 0 auf 120 m ³ /sec.	

Der Unterschied zwischen den Betriebswasserspiegeln im Wasserschloss in der Natur und im Modell erklärt sich daraus, dass der Limmatwasserspiegel im Anfangszustand des Versuchs, bei abgestellten Turbinen, für eine Wassermenge von 500 m³/sec eingestellt wurde und dass es während des Schwallvorganges nicht möglich war, das Nadelwehr der neuen Wassermenge anzupassen. Dieser Unterschied ist aber unerheblich, weil die Schwallhöhe durch den Wasserspiegel am Anfang des Versuchs bedingt ist.

Die drei Kaplanturbinen sind konstruiert für eine Wassermenge von je 40 m³/sec bei einem Nettogefälle von 21,11 m. Gleichung (13) lautet also für die Verhältnisse in der Natur:

$$Q_i' = \psi_i \cdot 26,1 \sqrt{H-z},$$

wobei H = 28,09, $\psi_i = 1,0$.

Vergleichsberechnungen zeigten, dass der Unterschied in den Turbinenwassermengen in der Natur und im Modell, der auf den verschiedenen Werten in Gleichung (13) beruht, für die in Frage kommenden Werte von z auf die Schwallhöhe praktisch keinen Einfluss ausübt.

Die oben angegebenen Verhältnisse der Natur bildeten die Grundlage für die endgültige Bemessung des Stollen-

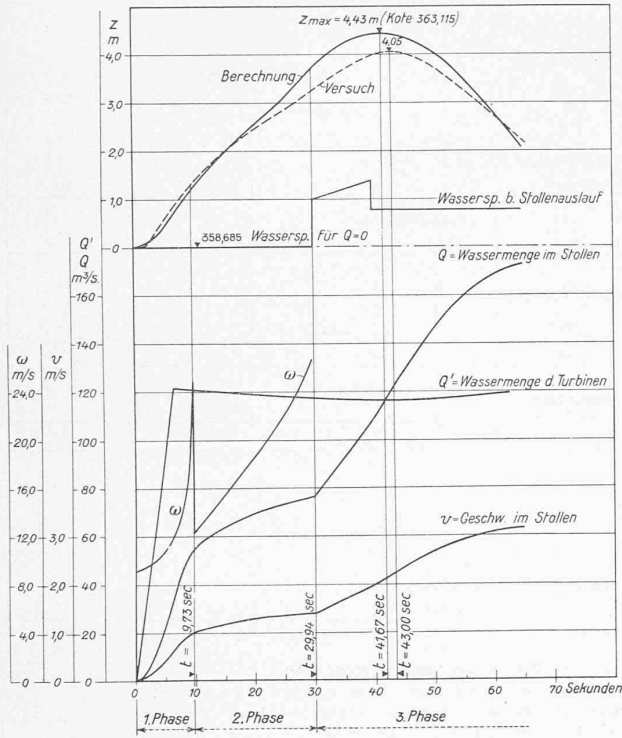


Abb. 20. Diagramm der rechnerisch ermittelten Spiegelschwankungen und Vergleich mit der Versuchskurve.

profils. Betrachtet man nämlich einseitig normale Betriebszustände, so ergibt sich, auf Grund wirtschaftlicher Vergleichsrechnungen, eine lichte Höhe des Stollens von 6,50 m bei einer lichten Weite von 8,50 m. Es wurde nun aber die Bedingung gestellt, dass auch bei einem Hochwasser in der Limmat von 500 m³/sec eine rasche Mehrbelastung der Turbinen von 50%, also eine plötzliche Zunahme der Turbinenwassermenge um 60 m³/sec einen Schwall erzeugen soll, der gerade noch frei unter der Stollenkalotte hindurch geht. Bei der ursprünglich vorgesehenen Lage der Sohle des Stollens ergab die Berechnung eine erforderliche Stollenhöhe von 8,00 m. Es konnte nun das nämliche Ergebnis erzielt werden, ohne wesentliche Beeinträchtigung der Energieproduktion bei NW, wenn man die Stollensohle um 30 cm hob und dafür die lichte Höhe auf 7,70 m verminderte. Dies ergab die in der Abb. 12/13 gezeichnete endgültige Anordnung. Das Resultat der rechnerischen Ermittlung der Spiegelschwankung im Wasserschloss ist in Abb. 20 graphisch dargestellt, in der zum Vergleich auch die durch den Modellversuch erhaltene Kurve aufgetragen wurde. Es ergibt sich hieraus:

	Schwallhöhe	Max. Anstieg	zur Zeit
laut Rechnung	363,11	4,43 m	41,7"
laut Versuch	362,73	4,05 m	43,0"

Der Unterschied im max. Anstieg beträgt rd. 9% und lässt sich erklären durch die der Berechnung zugrunde gelegten vereinfachten Hypothesen, besonders jene, auf die sich die Berechnung der zweiten Phase stützt, d. h. die Annahme einer vertikalen Wellenfront von endlicher Höhe. Die zwischen den beiden Kurven vorhandene zeitliche Verschiebung erklärt sich dadurch, dass die Trägheit der Wassermasse im Zulauf zu den Turbinen und in den Saugkrümmern nur annähernd berücksichtigt werden konnte, was dadurch erfolgte, dass die der Rechnung zugrundegelegte Öffnungszeit zu 6,5 sec angenommen wurde. Im genannten Diagramm sind weiter die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Stollen, die Turbinenwassermenge, die Wassermenge im Stollen und die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit der Berechnung gemäss aufgetragen, sowie auch der Verlauf des Wasserspiegels am Stollenauslauf.

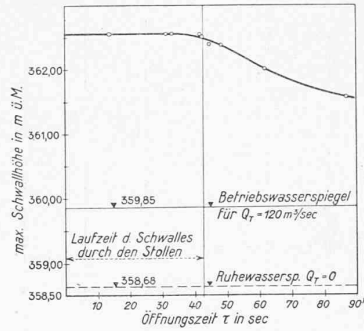


Abb. 21. Schwall im Wasserschloss. Maximaler Schwall in Funktion der Öffnungszeit der Turbinen bei $Q_T = 0$ bis 120 und $Q_L = 500$ m³/sec.

Nachdem der Vergleich der ersten Versuchsergebnisse mit der Rechnung befriedigende Übereinstimmung gezeigt hatte, war es gegeben, noch weitere Betriebsfälle allein versuchstechnisch zu behandeln. Die Berechnung ist ausserordentlich zeitraubend, während die Durchführung der Versuche, sobald das Modell einmal erstellt ist, sehr wenig Zeit beansprucht.

Für den ganz aussergewöhnlichen Fall eines Hochwassers von 700 m³/sec, das bisher in 20 Jahren bloss einmal aufgetreten ist, erschien es als notwendig, nachzuweisen, welche Belastungsschwankungen noch zulässig sind, ohne dass das Wasser vom Wasserschloss aus die untern Räume des Maschinenhauses überflutet. Als kritische Kote hat 363,00 zu gelten. Die Versuche ergaben:

Wasserführung der Limmat	700 m ³ /sec
Wasserstand beim Stollenauslauf	359,45 m ü. M.
Schwallhöhe im Wasserschloss bei plötzlicher Mehrbelastung um 40 m ³ /sec	um 80 m ³ /sec
360,90 m ü. M.	362,67 m ü. M.

Man sieht, dass das Werk auch bei diesem ganz aussergewöhnlichen Hochwasserabfluss noch mit zwei Maschinen ungestört arbeiten kann.

Für das Hochwasser von 500 m³/sec ist keine Einschränkung erforderlich.

Die nach der Theorie von Thoma für die Sicherung der Stabilität der Turbinenregulierung erforderliche horizontale Querschnittfläche des Wasserschlosses ist im vorliegenden Falle nicht zu berücksichtigen, da aus der Rechnung folgt, dass für eine Wasserführung der Limmat von 500 m³/sec erst eine Belastungsvermehrung von 60 m³/sec einen Schwall erzeugt, der den Scheitel des Stollens erreicht. Für kleine Belastungsschwankungen, bzw. für kleine Schwankungen des Gefälles bei konstanter Belastung tritt also das Wasserschloss noch gar nicht in Funktion, sondern die durch solche Vorgänge entstehenden Schwälle laufen mit freiem Spiegel ab.

Bei den gewählten Abmessungen der Wasserschlosskammer und des Stollens stellt also die Anordnung tatsächlich die in der Einleitung erwähnte Mittellösung dar. Der Einfluss der Öffnungszeit der Turbinen auf die Schwallhöhe kann in Analogie an die bekannte Theorie von Allievi auch für den vorliegenden Fall überblickt werden. Beim sogenannten Wasserschlag in Turbinendruckleitungen ist nachgewiesen, dass die Öffnungs- bzw. die Schliesszeit der Turbinen auf die Druckänderung so lange ohne Einfluss ist, als die Bewegung des Abschlussorgans in einer Zeit erfolgt, die kürzer ist als die sogenannte Reflexionszeit der Druckwelle $\tau < 2L/a$, wo L die Länge des Stollens und a die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit darstellt. Dieses nämliche Gesetz gilt auch für die Füllschwälle, solange sie den Stollenscheitel nicht berühren. Für Schwälle, die bis zum Stollenscheitel und darüber ansteigen, muss dagegen gesetzt werden $\tau < L/a$ d. h. nur die einfache Laufzeit ist massgebend. Dies geht deutlich aus Abb. 21 hervor, in der die Schwallhöhe in Funktion der Öffnungszeit laut den Versuchen aufgetragen ist. Die Abweichung vom Allievi'schen Gesetz lässt sich dadurch erklären, dass die Fortpflanzung der rückwärtslaufenden Welle nach den Gesetzen für geschlossene Rohrleitungen, also um ein Vielfaches rascher verläuft, sodass die Rücklaufzeit gegenüber der Vorlaufzeit praktisch gar nicht mehr in Frage kommt.

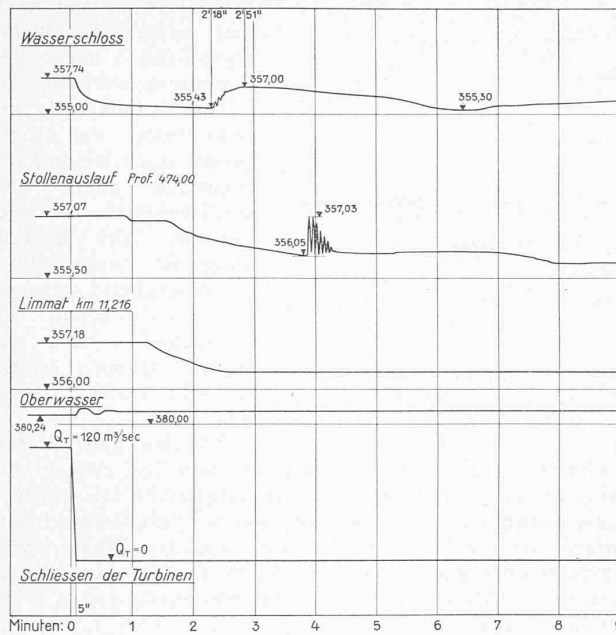


Abb. 22. Diagramm eines Sunkversuches (Versuch 4). Schliessen der Turbinen von 120 auf 0 m³/sec in 5 Sekunden bei $Q_{Limmat} = 0 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Von Interesse ist der Verlauf des Absperrunkes bei rascher Entlastung der Turbinen. Ein solcher Fall ist in Abb. 22 dargestellt; es handelt sich um den Abschluss der Turbinen von 120 auf 0 m³/sec in 5 sec. Der Versuch wurde bei niederem Wasserstand der Limmat ausgeführt, um nachzuweisen, ob infolge des Sunkes atmosphärische Luft in die Saugkrümmer eintreten kann. Die Versuche haben die genügend tiefe Lage der Saugkrümmer erwiesen.

Wenn, wie schon mehrfach erwähnt, die rechnerische Behandlung selbst für einfache Fälle, in denen es sich nur um einmalige Bewegung der Abschlussorgane der Turbinen handelt, recht zeitraubend ist, so wird die Behandlung komplizierter Fälle, wie z. B. die Aufeinanderfolge von Entlastungen und Belastungen der Turbinen fast zur Unmöglichkeit. Solche Fälle sind aber versuchstechnisch leicht abzuklären. Es handelt sich um die Untersuchung von Resonanzerscheinungen. Das ungünstigste Bild zeigt eine Entlastung von 120 auf 0 m³/sec und eine nachfolgende Belastung von 0 auf 120 m³/sec (als Extremfall von rein theoretischem Interesse), wenn die Belastung nach rund 100 sec auf die Entlastung erfolgt. Ein solcher Fall ist in Abb. 23 dargestellt. Erfolgt nämlich die Belastung gerade in dem Moment, in dem die rücklaufende erste Welle im Wasserschloss wieder anzusteigen beginnt, so tritt eine gewaltige Verstärkung des Schalles durch Addition beider Wellen ein, indem laut Abb. 23 der Schwall im Wasserschloss gegenüber Abb. 20 um 2,44 m höher ansteigt und also die als kritisch bezeichnete Kote überschreitet. Analoge Bilder entstehen bei andern Fällen von Resonanz. Als gefährlich wurden auf Grund einer grossen Anzahl von untersuchten Möglichkeiten folgende Fälle bezeichnet: Limmatwassermenge höher als 500 m³/sec; Abwechselnde Belastungen und Entlastungen in der Grössenordnung von $\pm 80 \text{ m}^3/\text{sec}$ und in Intervallen von etwa 100 sec, welche Betriebsfälle durch geeignete Massnahmen auszuschliessen sind.

Rasch aufeinander folgende Entlastungen und Belastungen in Intervallen von 5 bis 6 sec, wie sie infolge Kurzschlusses auftreten können, sind dagegen vollständig harmlos, wie Abb. 24 zeigt.

In ähnlicher Weise, wie für das Limmatwerk Wettigen wurden für das Kraftwerk Etzel die Betriebsverhältnisse im Unterwasserstollen versuchstechnisch untersucht und die

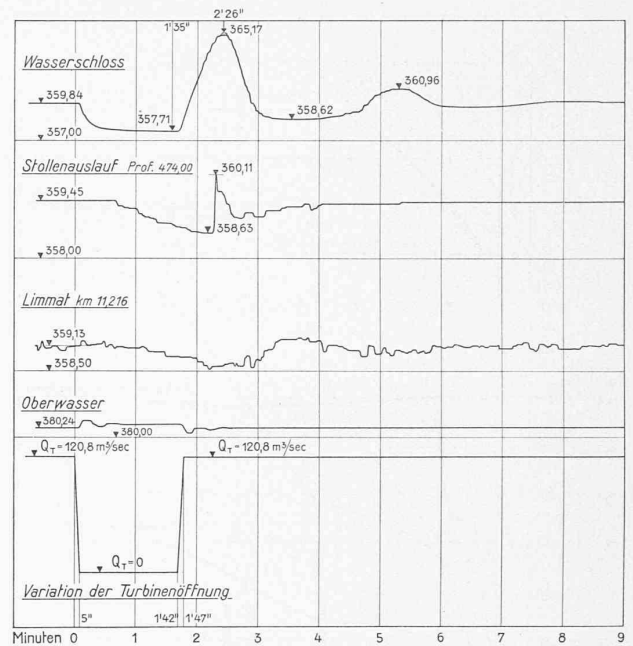


Abb. 23. Resonanzerscheinung (Versuch 3c). Schliessen der Turbinen von 120 auf 0 m³/sec in 5 Sekunden, nach 100 Sekunden Öffnen der Turbinen von 0 auf 120,8 m³/sec in 5 Sekunden. $Q_{Limmat} = 500 \text{ m}^3/\text{sec}$.

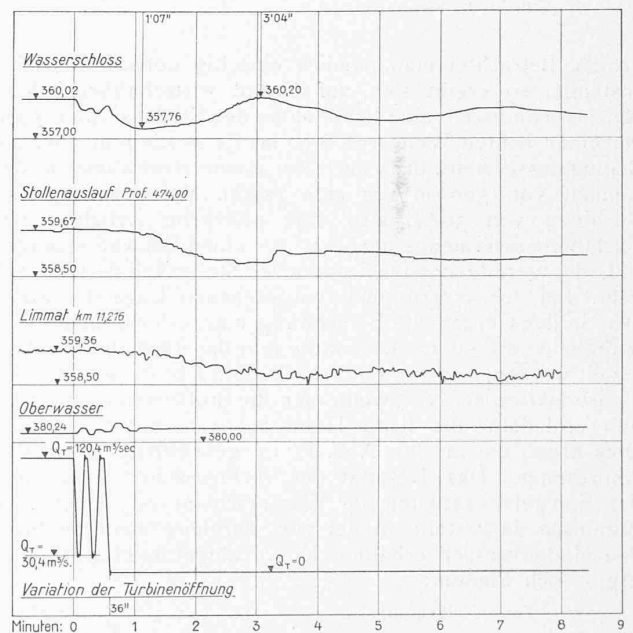


Abb. 24. Interferenzerscheinungen (Versuch 37). Abwechselndes Schliessen und Öffnen der Turbinen von 120 auf 30 m³/sec. $Q_{Limmat} = 580 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Grenzen festgelegt, innerhalb deren Belastungsschwankungen ohne weiteres vom Stollen aufgenommen werden können. Eine Wiedergabe der entsprechenden Diagramme würde aber hier zu weit führen.

Es dürfte durch die vorliegende Arbeit gelungen sein, zu zeigen, wie theoretische Untersuchungen und Modellversuche Hand in Hand schwierige Probleme des modernen Kraftwerkbaues zu lösen vermögen. Es darf wohl aus dem vorstehenden der Schluss gezogen werden, dass für kompliziertere Fälle nach wie vor der Modellversuch rascher und sicherer zum Ziel führt als die Rechnung.