

**Zeitschrift:** Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 67 (1975)  
**Heft:** 8-9

**Artikel:** Hydraulische Modellversuche für die Kraftwerke Oberhasli  
**Autor:** Hänger, Martin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-920933>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.08.2025

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

Martin Hänger

Zur Zeit werden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) in Zürich drei verschiedene Modellversuche im Zusammenhang mit Um- und Neubauten der Kraftwerke Oberhasli durchgeführt.

Untersucht werden folgende Objekte:

- Die Drosselung zum Wasserschloss Kessiturm des Umwälzwerkes Grimsel-Oberaar
- Das Ein- und Auslaufbauwerk im Grimselsee des Umwälzwerkes Grimsel-Oberaar
- Der Umbau der Wasserfassung Grimsel-Gelmersee

Im folgenden soll hier der Modellversuch zur Wasserschlossdrosselung kurz beschrieben werden. Einführend stehen ein paar allgemeine, grundlegende Ausführungen zur Funktion des Wasserschlosses und zum Prinzip des gedrosselten Wasserschlosses.

## 1. Einleitung

### 1.1 FUNKTION EINES WASSERSCHLOSSES

Jede Durchflussänderung in einer unter Druck stehenden Leitung führt zu Druckstössen. Das Ausmass des Druckstosses ist abhängig von der Länge der Leitung.

In Bild 1 ist eine Hochdruckanlage schematisch dargestellt. Aus wirtschaftlichen Gründen sind die Teile, die einem hohen Druck unterliegen, grundsätzlich kurz gehalten. Die Falleitung als Druckleitung oder als Druckschacht ausgebildet, ist deshalb meist kürzer als der Druckstollen. In einem System ohne Wasserschloss läuft der Druckstoss vom Regulierungsorgan über Falleitung und Druckstollen bis zur Wasserfassung durch. Das hat zur Folge, dass das ganze System, auch der Druckstollen, auf diese Druckspitzen ausgelegt werden müsste. Dabei ist im hochliegenden Druckstollen das Verhältnis von statischem Druck und dem durch den Druckstoss erzeugten Unter- oder Ueberdruck besonders ungünstig. Es kann eine Druckreduktion bis auf den Dampfdruck des Wassers eintreten. Als Folge wäre mit unwirtschaftlich hohen Ausbaurkosten für den langen Druckstollen zu rechnen. Um dies zu verhindern, wird bekanntlich am Anfang der Falleitung ein Wasserschloss angeordnet. Das Wasserschloss stellt ein kleines Reservoir mit freier Oberfläche und somit eindeutig bestimmtem Druck dar, welches das Drucksystem unterteilt und den Druckstoss reflektiert. Der Druckstoss bleibt damit auf die Falleitung beschränkt, die ohnehin unter einem hohen statischen Druck steht. Damit wird durch Verkürzung des Systems der Druckstoss einerseits grössenmässig reduziert und andererseits vom Druckstollen ferngehalten.

Von der rein statischen Beanspruchung abgesehen, erfordert auch die Regulierung der Maschinen ein Wasserschloss. Die verkleinerte Trägheit der Wassermassen lässt die Schwungmassen in wirtschaftlichen Grenzen halten.

Als Folge der Anordnung eines Wasserschlosses entstehen Massenschwingungen, die sogenannten Wasserschloss-Schwingungen. Im Wasserschloss wird alternierend die bei Betriebsänderungen freiwerdende bzw. benötigte kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt. Manko oder Ueberschuss an zufließendem Wasser werden durch den Speicherinhalt des Wasserschlosses geliefert bzw. aufgenommen, bis sich ein Beharrungszustand eingestellt hat.

Druckstoss und Massenschwingung spielen sich mit ganz unterschiedlichen Perioden ab. In den meisten Fällen ist der Druckstoss bereits abgeklungen, wenn sich die Massenschwingung noch im Anfangsstadium befindet. Ferner umfasst die Massenschwingung nur diejenigen Wassermassen, die vom Druckstoss praktisch nicht erfasst werden und umgekehrt. Die beiden Erscheinungen können deshalb getrennt betrachtet werden.

### 1.2 PRINZIP DES GEDROSSELTEN WASSERSCHLOSSES

Beim gedrosselten Wasserschloss besteht zwischen Druckstollen einerseits und dem Wasserschloss andererseits keine verlustlose Verbindung. Am Wasserschloss ein- oder ausfließendes Wasser durchströmt ein Drosselungsorgan. Durch den an der Drosselung auftretenden Ueber- oder Unterdruck gegenüber der Spiegellage im Wasserschloss wird die Beschleunigung oder Verzögerung des Wassers im Stollen massgebend beeinflusst. Die Spiegelausschläge im Wasserschloss während der Massenschwingung werden gedämpft, wodurch wesentliche Einsparungen am Wasserschlossvolumen erzielt werden können.

Dem Mass der Drosselung sind jedoch Grenzen gesetzt, da sonst Druckstösse nicht mehr vollständig am Wasserschloss reflektiert werden und sich die Trägheit der Wassermassen, die der Regelung unterworfen sind, erhöht.

Der Drosselwiderstand wird im allgemeinen auf ein solches Mass beschränkt, dass der Druck im Druckstollen während der Massenschwingung den hydrostatischen Druck infolge der Extremalspiegel im Wasserschloss nicht über- oder unterschreitet. Unter extremen Spiegellagen verschwindet der Drosselverlust, da dann der Durchfluss durch die Drosselung praktisch verschwindet. Die Beschränkung des Drosselwiderstandes liefert im allgemeinen andere Bedingungen für den Fall «Entlastung» (wenn das Wasser ins Wasserschloss ausweicht), als für den Fall «Belastung» (wenn das Wasser aus dem Wasserschloss ausströmt). Um gleichzeitig beide Bedingungen zu befriedigen, kann die Drosselung so ausgebildet werden, dass sich je nach Durchflussrichtung ein anderer Druckverlust ergibt. Für Belastung muss die Drosselwirkung generell schwächer sein als für Entlastung.

### 1.3 ZUR PLANUNG EINER DROSSELUNG MIT VORBESTIMMTEM WIDERSTAND

Der Druckverlust einer Wasserschlossdrosselung setzt sich aus Umlenkverlusten, aus Verlusten an Rohrverzweigungen, aus Einschnürungs- und Erweiterungsverlusten zusammen. Die richtige Berechnung des Drosselwiderstandes ist von ausschlaggebender Bedeutung für die Wirkung des gedrosselten Wasserschlosses. Es handelt sich also

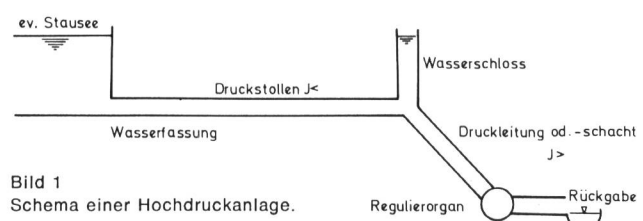


Bild 1  
Schema einer Hochdruckanlage.

darum, aus Einzelverlusten diesen Drosselwiderstand zu ermitteln. Eine einfache Superposition ist dabei nur möglich, wenn die einzelnen Verlustquellen genügend weit auseinanderliegen, so dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussen (vgl. dazu [1])<sup>1</sup>.

Folgen die einzelnen Hindernisse kurz aufeinander, so lässt sich der Gesamtwiderstand überhaupt nur durch Modellversuche ermitteln. Solange keine Mess- oder Beobachtungswerte vorliegen, wird mit dem Drosselorgan ein besonderes Unsicherheitselement in die Rechnung getragen. Man wird deshalb so vorgehen, dass man zur Wasserschlossberechnung einen brauchbaren Drosselverlust festlegt und anschließend aufgrund von Modellversuchen die geometrische Form der Drosselöffnung entsprechend bestimmt.

## 2. Das Modell und die Modellversuche

Die VAW erhielt den Auftrag, die Drosselung für das Wasserschloss des Umwälzwerkes Grimsel-Oberaar so zu gestalten, dass sie folgende, vom Projektverfasser der Ingenieurunternehmung AG, Bern, aufgestellte Charakteristik aufweist:

Bei Entlastung:  $h = 0.0009 Q_1^2$

Bei Belastung:  $h = 0.0005 Q_1^2$

Dabei ist  $h$  die Verlusthöhe in m bezogen auf die Differenz zwischen der Drucklinie im Wasserschloss und der Drucklinie im Stollen.  $Q_1$  stellt die Drosselwassermenge in  $m^3/s$  dar, die der in das Wasserschloss oder aus demselben strömenden Wassermenge entspricht. Bei den durchzuführenden Versuchen handelte es sich nicht um die Er-

[<sup>1</sup>] Siehe Literaturnachweis am Ende des Berichts

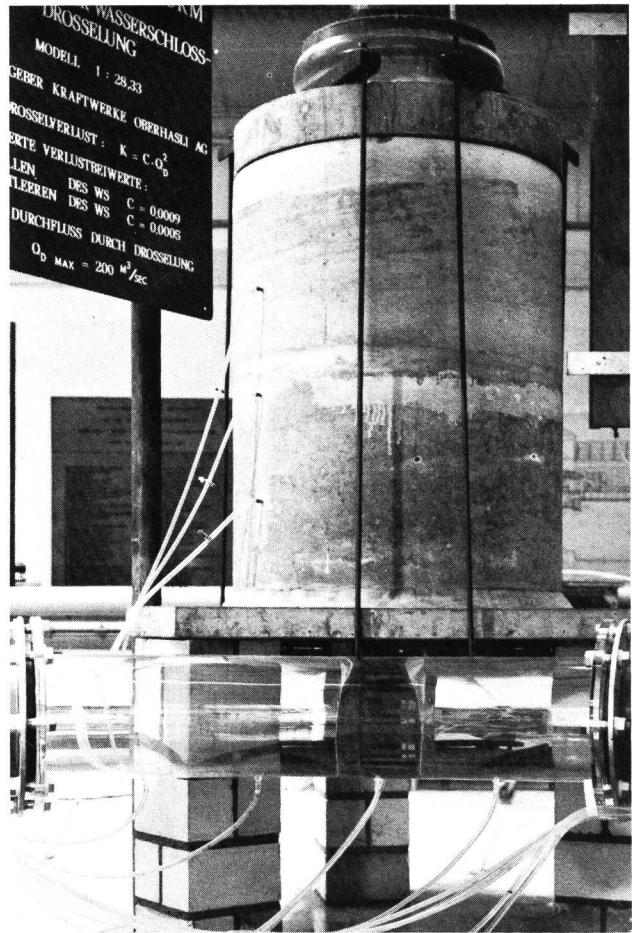


Bild 2 Teilansicht des Modells im Massstab 1:28,33 Druckstollen aus Plexiglas, dahinter die untere Kammer des Wasserschlosses; sichtbar ebenfalls die Piezometeranschlüsse zur Druckmessung.

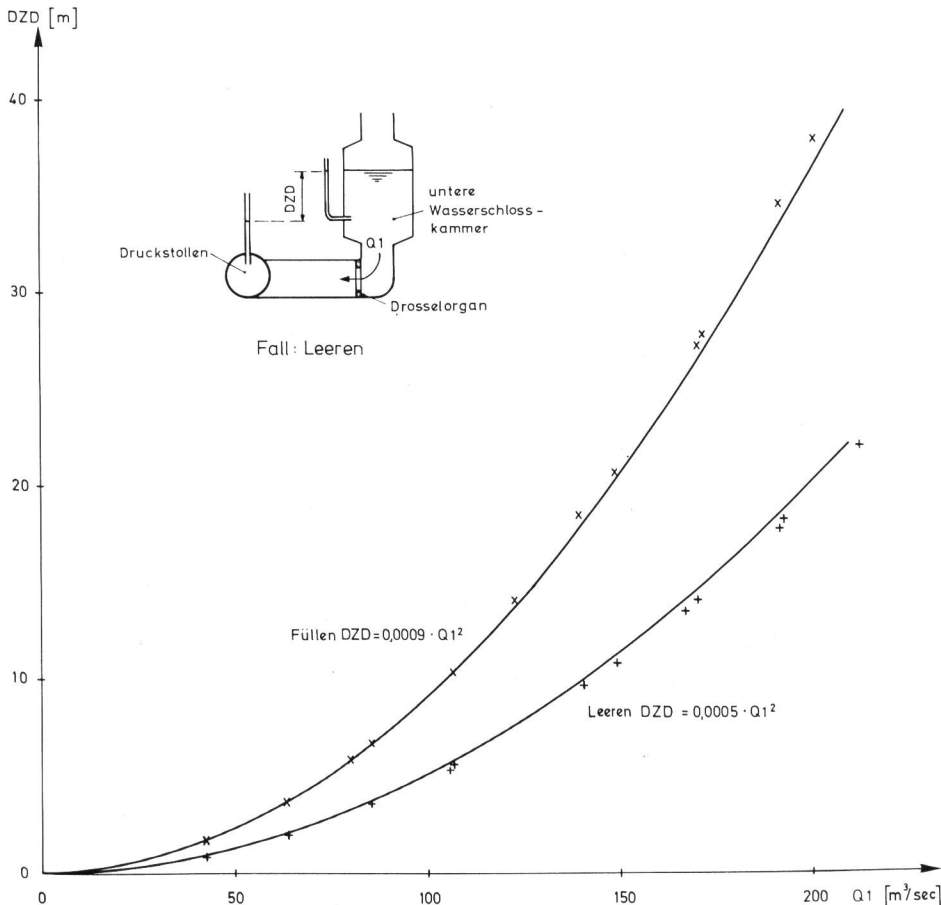


Bild 3 Gemessene Drosselverluste DZD in Funktion der Drosselwassermenge  $Q_1$  für «einfache Strömungsfälle». Im Vergleich dazu die Kurven der geforderten Drossel-Charakteristik. Der Drosselverlust ist definiert als Druckliniendifferenz zwischen Druckstollen und unterer Wasserschlosskammer.

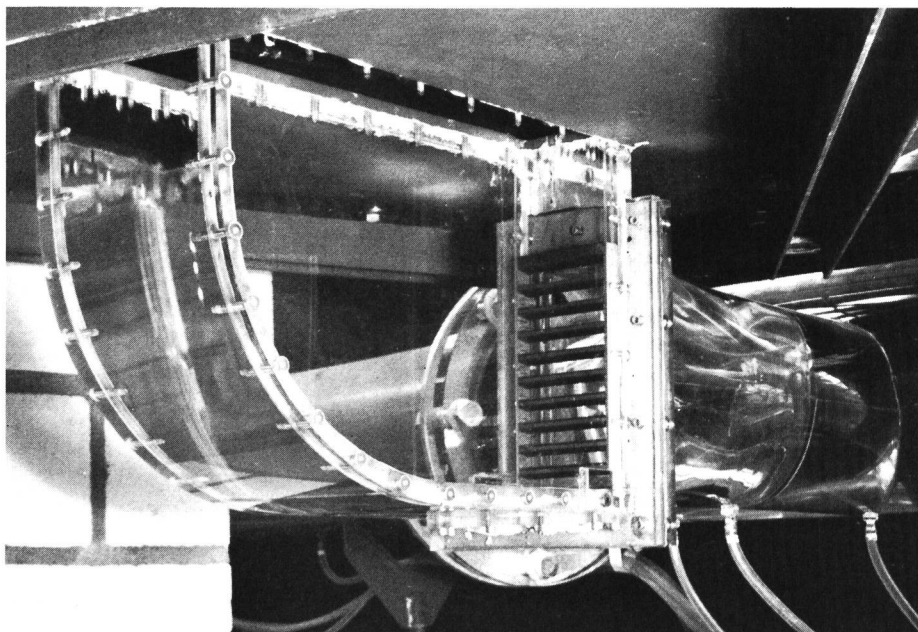


Bild 4  
Eingebautes Drosselorgan im Abzweigstollen vom Druckstollen zur unteren Wasserschlosskammer.

mittlung der Wasserschlossschwingung, sondern um die Bestimmung von Drosselverlusten in Funktion der Drosselwassermenge. Ein solcher Versuch kann mit stationären Durchflusszuständen ausgeführt werden. Zur Druckmessung genügen einfache Piezometer, und weil nur Druckdifferenzen interessieren, konnte ein Druckmodell, das unter einem beliebigen Absolutdruck steht, angewendet werden. Im Massstab 1:28,33 wurde eine Strecke von 35 m des Druckstollens, der Abzweigstollen zum Wasserschloss mit dem Drosselelement und die untere Wasserschlosskammer nachgebildet (siehe Bild 2). Im Projekt ist das Drosselelement als Gitter mit horizontalen Stäben vorgesehen. Es besitzt den Vorteil, dass es auch in der Bauausführung noch verändert werden kann, um eventuell nötige Anpassungen vorzunehmen. Das Drosselorgan wird an der Einmündung des hier rechteckigen Abzweigstollens ins Wasserschloss angeordnet.

## 2.1 VERSUCHSAUSFÜHRUNG

Der Betrieb eines Pumpspeicherwerkes bringt bei Betriebsänderungen an der Einmündung des Abzweigstollens und in der Strömungsrichtung durch das Drosselorgan verschiedene typische Fälle. Als erstes können sogenannte einfache Strömungsfälle ausgeschieden werden. Bei diesen fließt das Wasser im Stollen nur von einer Seite zu oder nach einer Seite weg und fließt gesamthaft durch den Abzweigstollen zum Wasserschloss. Ferner sind sechs kombinierte Strömungsfälle möglich, wobei eine Verzweigung oder Vereinigung von Wasserströmen eintritt. In einer ersten Versuchsreihe wurde die Geometrie der Gitterstäbe ermittelt, welche die geforderten Drosselungswerte aufwies. Man beschränkte sich dabei auf «einfache Strömungsfälle», wobei sich das quadratische Gesetz des Drosselverlustes in Funktion der Drosselwassermenge als gültig

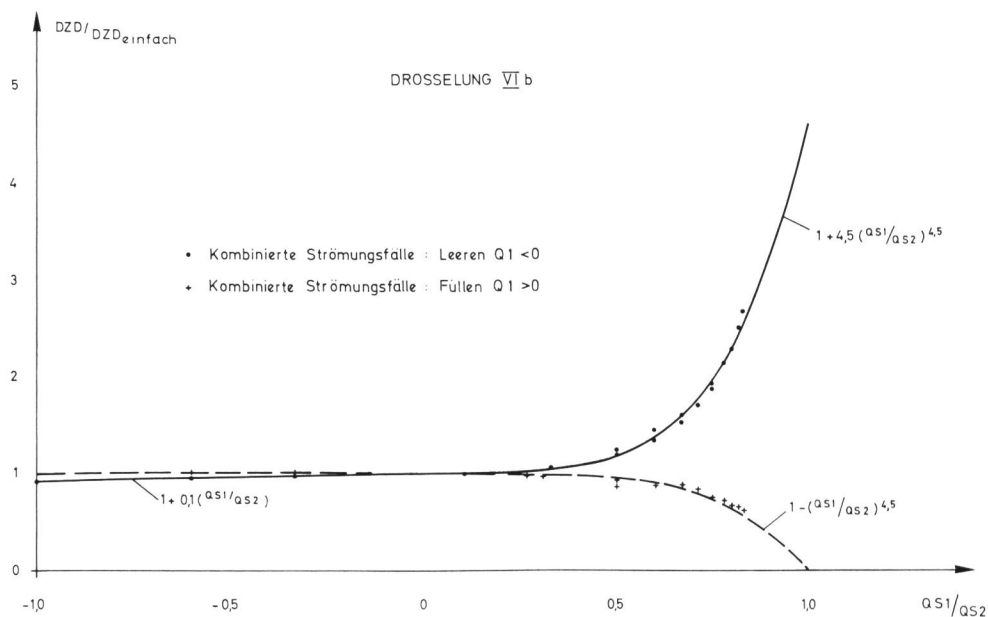


Bild 5  
Unter «kombinierten Strömungsfällen» weicht der Drosselverlust  $DZD$  ab von den Werten für die Drosselverluste «einfache Fälle». Für verschiedene Drosselwassermengen ist das gemessene Verhältnis von «kombiniertem» zu «einfachem» Fall in Funktion des Quotienten der Wassermengen im Druckstollen vor ( $Q_{S1}$ ) und nach ( $Q_{S2}$ ) der Einmündung des Abzweigstollens angegeben.  $Q_{S1}/Q_{S2} = 0$  bezeichnet dabei den «einfachen» Fall, für positive Werte ist die Fließrichtung im Druckstollen vor und nach der Verzweigung gleich, für negative Werte entgegengesetzt. Die Kurven stellen eine Approximation der Messwerte für ein modifiziertes Drosselgesetz dar.

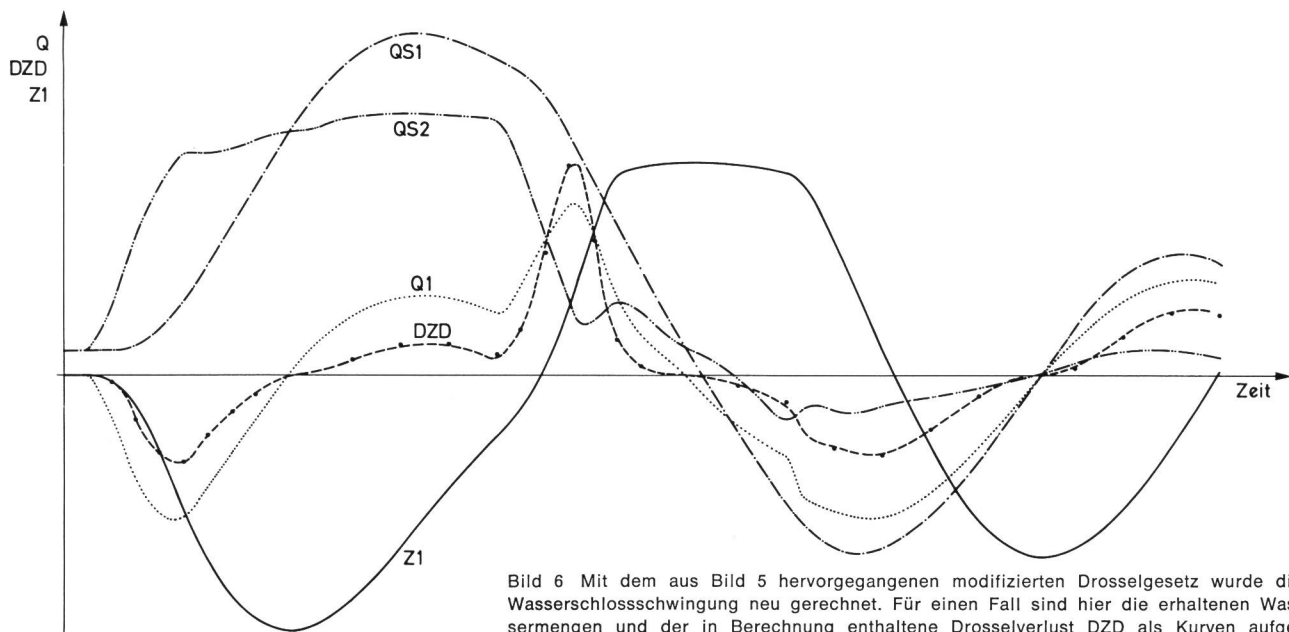


Bild 6 Mit dem aus Bild 5 hervorgegangenen modifizierten Drosselgesetz wurde die Wasserschlossschwingung neu gerechnet. Für einen Fall sind hier die erhaltenen Wassermengen und der in Berechnung enthaltene Drosselverlust DZD als Kurven aufgetragen. Zur Kontrolle der Drosselverluste sind auch die mit den entsprechenden Wassermengen gemessenen Drosselverluste eingezeichnet.

Q1 ist die durch den Abzweigstollen fließende Drosselwassermenge, QS1 der Durchfluss durch den Druckstollen auf der Seite Richtung Oberaarsee, QS2 der Durchfluss durch den Stollen auf der Seite Richtung Zentrale, Z1 schliesslich gibt die Wasserspiegelhöhe im Wasserschloss an. Der vorliegende Fall entspricht einem Anfahren im Turbinenbetrieb mit anschliessendem Schliessen der Schieber während der Entlastung.

erwies, vgl. Bild 3. Die Idee, mit Hilfe eines Gitters aus horizontalen Stäben einen unterschiedlichen Drosselverlust je nach Durchflussrichtung zu erhalten, hat sich als ausführbar erwiesen. Die scharfkantigen, trapezförmigen Stäbe, die in Natur eine Länge von 4 m aufweisen, müssen mit der Schmalseite Richtung Wasserschloss angeordnet werden, vgl. Bild 4.

In einer zweiten Phase wurden die erhaltenen Drosselungsformen bei «kombinierten Strömungsfällen» untersucht. Die Drosselverluste folgten dabei nicht mehr dem einfachen quadratischen Gesetz. Für «Entlastung» wurden dabei etwas kleinere, für «Belastung» grössere Werte gemessen, als für die einfachen Fälle. Aufgrund einer Versuchsreihe mit kombinierten Strömungsfällen wurde sodann ein modifiziertes Drosselgesetz aufgestellt, das auch die Durchflussmengen im Druckstollen berücksichtigt, siehe Bild 5.

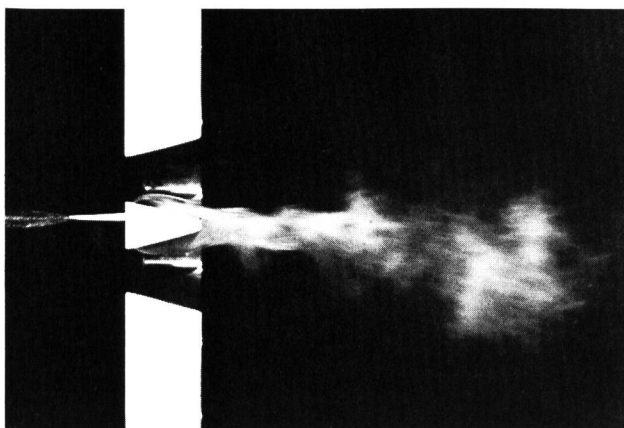


Bild 7 Am teilweise aufgeschnittenen Drosselorgan ist die Ablösung an der Eintrittskante und die anschliessende Einschnürung der Strömung durch Farbbeigabe sichtbar gemacht.

Zum Vergleich haben wir mit den im Modellversuch erhaltenen Drosselungsbeiwerten und dem modifizierten Widerstandsgesetz für bekannte Fälle die Massenschwingungen neu gerechnet. Die Resultate dieser Berechnungen liefern die Strömungsfälle für eine abschliessende Kontrollmessung. Die mit dem modifizierten Drosselgesetz berechneten und die aufgrund der berechneten Wassermengen gemessenen Drosselverluste zeigen dabei eine gute Übereinstimmung, siehe Bild 6.

### 3. Schlussfolgerungen

Der vorliegende Fall kann als typisch für die Anwendung von Modellversuchen betrachtet werden, wo eine rechnerische Lösung des Problems in seiner Komplexität nicht möglich ist. Schon früher an der VAW durchgeführte Arbeiten zur Eichung oder zur konstruktiven Gestaltung von Wasserschlossdrosselungen bewähren sich, was die Modellähnlichkeit bestätigt. Bei der verwendeten Froudschen Ähnlichkeit muss jedoch einschränkend darauf geachtet werden, dass die in Natur vorhandenen Fließzustände auch im Modell auftreten. So darf ein natürlich turbulenter Vorgang in verkleinertem Massstab nicht laminar werden und müssen z. B. in der Natur zu erwartende Ablösungserscheinungen auch im Modell auftreten.

Die vorliegend angewandte Lösung mit scharfkantigen Stäben erfüllt diese Bedingung, wie Ablösungen an den Stäben des Drosselelementes zeigen, siehe Bild 7.

#### LITERATUR:

[1] J. Frank, Nichtstationäre Vorgänge in Zuleitungs- und Ableitungskanälen von Wasserkraftwerken, Springer, 1957

Adresse des Verfassers:

Dipl. Ing. M. Hänger  
Versuchsanstalt für Wasserbau  
Hydrologie und Glaziologie/ETHZ  
Gloriastrasse 37—39, 8006 Zürich



Am 21. Juni 1975 fand in Innertkirchen die Jubiläumsfeier der Kraftwerke Oberhasli AG statt, um der 50jährigen Tätigkeit und Entwicklung der Gesellschaft zu gedenken. Ein Teil der etwa 150 Gäste begab sich mit der s. Z. von der KWO erstellten Schmalspurbahn mit festlich geschmückter Dampflokomotive von Meiringen nach Innertkirchen.

Den Auftakt bildete ein Begrüssungsmarsch der Dorfmusik, gefolgt von einer Gedenkstunde in der Kirche, wo die beiden Festansprachen mit kammermusikalischen Darbietungen umrahmt wurden.

Nationalrat H. Tschumi, Präsident des Verwaltungsrates der KWO, entbot die Grüsse der Gesellschaft, verbunden mit einem knappen Rückblick auf die abwechslungsreiche Entwicklung und intensive Bau- und Betriebs-tätigkeit des Unternehmens, wobei er einleitend darauf hinwies, dass die Bergwasser einen der wertvollsten Rohstoffe unseres hochindustrialisierten Landes darstellen. Im Oberhasli befinde man sich im Herzen einer wertvollen Rohstoffquelle dieser Art. Als äussere Wahrzeichen weisen die elegant und kühn angelegten Staumauern und die weniger ästhetischen, dafür aber wertvollen Hochspannungsleitungen auf diese Tatsache hin. Schon vor Jahrhunderten



Bild 1 Festzug von Meiringen nach Innertkirchen.

Bild 2 Festbankett in der Kraftwerkzentrale Handeck II.



hatte die Grimsel eine gewaltige Anziehungskraft auf die Fürsten und Handelsleute der Länder nördlich und südlich des Alpenwalls. Im Mittelalter spielte sie im internationalen Nord-Südverkehr eine bedeutende Rolle. Dass es wegen dieses wichtigen Verbindungsweges in den damaligen Zeiten immer wieder zu Streitigkeiten zwischen den Haslern und den Oberwallisern kam, ist fast selbstverständlich. Die Gründe zu diesen Reibereien waren die ungenau beschriebenen Besitzansprüche an den Alpen und vor allem auch die Zollerhebungen. Bei der Entstehung eines solchen Werkes, wie es die Anlagen der KWO darstellen, steht trotz hochentwickelter technischer Hilfsmittel im Mittelpunkt des Geschehens immer noch der Mensch mit seiner Idee, seinem Erfindergeist und seinem geistigen und körperlichen Einsatz — die Ingenieure mit ihrem ganzen Stab, die Bauführer und Mineure und die Arbeiter aller Kategorien. Dazu gehören die Träger des Werkes, die Geld geben, d.h. die Aktionäre, wie die einzelnen kleinen und grossen Zeichner, die dem Werk vertrauensvoll ihre Spargelder zur Verfügung stellen. Zu den Trägern und Förderern dieses Werkes gehört aber auch die Talschaft hier oben, die das Land zur Verfügung gestellt und mit ihrem guten Willen stets helfend mitgewirkt hat. Schlicht und einfach dürfe festgestellt werden, dass dieses Werk, dem der heutige Ehrentag gilt, ein Werk des ganzen Volks ist. Es ist kein menschenausbeutendes, kapitalistisches Unternehmen, wie man heute da und dort alle diese Elektrizitätswerke anzuprangern pflegt. Es ist ein verbindendes Werk zwischen dem Kanton Bern, vertreten durch die BKW, und den Städten Bern, Basel und Zürich und ihren Volksgemeinschaften. So sind die Hochspannungsleitungen nicht nur die Ueberträger der elektrischen Energie schlechthin, sie sind vielmehr auch Sinnbild der Verbindung zwischen Berg und Tal. Durch ihre Leitungen geht nicht nur Leistung hinab ins Tal, sie bringen im bildlichen Sinn auch solche herauf in den Berg.

Nach Abstattung des Dankes für die zahlreichen und vielfältigen Leistungen aller Art im Verlaufe des verflorenen halben Jahrhunderts, entbot Ingenieur F. Zingg, Direktor der KWO, einen kurzen Rückblick auf die Baugeschichte des Unternehmens, über die am Anfang dieses Heftes ausführlich berichtet wird. Dieser Rückschau seien daher nur noch folgende ergänzende Bemerkungen entnommen: Bei einem max. Arbeiterbestand von 1900 Mann (Handeck I) wurden rund 45 Mio Arbeitsstunden geleistet. 110 km Stollen und Schächte wurden erstellt und dabei zusammen mit Zentralenkavernen und Staumauerfundamenten 1,2 Mio m<sup>3</sup> Fels ausgebrochen. Es wurden für die Staumauern und übrigen Bauten 1,5 Mio m<sup>3</sup> Beton eingebracht und dazu 300 000 Tonnen Zement benötigt. Die gesamten elektro-mechanischen Einrichtungen weisen ein Gewicht von 30 000 Tonnen auf. 13 km Schmalspurbahnen und 72 km Seilbahnen wurden erstellt und 33 km Strassen neu gebaut. Für die Energieübertragung und -versorgung und für die Steuerung sind 85 km Hochspannungsleitungen, davon 25 km als Kabel, 100 km 16 kV-Leitungen, 85 km Niederspannungs- und Steuerkabel und 30 km Funkverbindungen gebaut worden. Dazu kommen noch die Hochspannungsleitungen von Innertkirchen zu den Partnern.

Nach der Gedenkstunde fand das Festbankett in der Zentrale des Kraftwerks Innertkirchen II statt, wobei hier im Laufe des Essens nicht weniger als sieben Redner zum Worte kamen, um die Gratulationen verschiedener Behörden, der Presse und Partner zu entbieten; zudem bereicherten verschiedene Gesangsdarbietungen örtlicher Vereine die gutgelungene Feier. G. A. Töndury