Hydrodynamik bei Wasserkraftwerden: besondere Aspekte bei Betrieb, Unterhalt und Sanierung

Autor(en): **Billeter, Peter / Volkart, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **112 (1994)**

Heft 10

PDF erstellt am: **15.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-78400

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Hydrodynamik bei Wasserkraftwerken

Besondere Aspekte bei Betrieb, Unterhalt und Sanierung

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) beschäftigte sich in den vergangenen Jahren im Rahmen von Forschungsprojekten und Expertenarbeiten vermehrt mit hydrodynamischen Phänomenen und deren Auswirkungen im konstruktiven Wasserbau. Gestützt auf theoretische Überlegungen und praktische Beispiele gewinnt das Wissen um strömungsdynamische Prozesse wie Kavitation, Lufteintrag und Schwingungen für den sicheren und effizienten Betrieb von Kraftwerken im Zuge anstehender Sanierungen noch vermehrt Bedeutung.

VON PETER BILLETER UND PETER VOLKART, ZÜRICH

Fluiddynamik und Hydraulik im Wasserbau

Anlässlich des Kongresses der International Commission on Large Dams (ICOLD) 1967 berichteten Arthur & Jabara vom United States Bureau of Reclamation (USBR), dass «some of the major difficulties experienced by the USBR in the operation and maintenance of spillways and outlet works of large dams are the result of the imposition of dynamic and erosive forces on critical areas of concrete surfaces of water conveyance structures» [1]. Dem ist beizufügen, dass nicht nur grosse Dämme und Betonoberflächen von den Einwirkungen dynamischer Strömungskräfte betroffen sind, sondern generell alle Strömungsberandungen, entlang welcher grosse Druckgradienten und hohe Fliessgeschwindigkeiten auftreten: Entlastungsbauwerke aus Beton wie Schussrinnen und Wehrbauten, aber auch Stahlwasserbauten wie Schützen, Schieber und Rechen und schliesslich die Triebwassersysteme und die Turbinen. Die Bedeutung hydrodynamischer Effekte und deren Auswirkungen auf die Wasserkraftwerke in der Schweiz kann anhand eines Vergleichs der Entwicklungen im Anlagebau und in der hydraulischen Forschung herausgestrichen werden. Die Geschichte der elektrischen Wasserkraftnutzung in der Schweiz lässt sich in vier Phasen gliedern [2]:

- Pionierzeit 1880 ÷ 1918
- Der gemässigte Ausbau 1919 ÷ 1947
- Der stürmische Ausbau 1948 ÷ 1972
- Der Endausbau seit 1972.

Die Erstellung der Laufkraftwerke, vor allem der Kraftwerke an den grösseren Schweizer Flüssen, geschah mehrheitlich schon in der Periode des gemässigten Ausbaus. Die Realisierung der grossen Speicherkraftwerke in den Alpen und Voralpen erreichte ihren Höhepunkt in der Periode des stürmischen Ausbaus Mitte der 50er bis Mitte der 60er Jahre. Bis 1972 waren in der Schweiz bereits 87% der bis 1992 vollendeten Anlagen realisiert und erbrachten 91% der für 1992 erwarteten Energieproduktion (32 124 GWh).

Das theoretische Fundament für die Umwandlung des schwerkraftbedingten Energiepotentials des Wassers in Rotationsenergie (kinetische Energie) der Wasserturbinen liefert die Fluiddynamik. Die Grundgleichungen sind die aus dem Impulssatz am infinitesimalen Fluidteilchen hergeleitete Navier-Stokes'sche-Gleichung und die sich aus der Massenerhaltung ergebende Kontinuitätsgleichung. Aus den Grundgleichungen lassen sich durch Parameterreduktion und Integration über Raum und Zeit die Formeln der angewandten Hydraulik ableiten (vgl. Bild 1). Damit wird die Hydraulik als eine eindimensionale, auf Mittelwerte abgestütze Betrachtungsweise eingegrenzt. Die im konstruktiven Wasserbau angewandten hydraulischen Formeln – oftmals explizite Potenzansätze mit zum Teil dimensionsbehafteten Koeffizienten – waren grösstenteils bereits Ende des letzten Jahrhunderts bekannt.

Hydrodynamische Effekte bei Wasserbauten können aus der «klassischen» Hydraulik nicht abgeleitet werden, da diese die räumliche und zeitliche Variation der Strömungsgrössen nicht beschreibt. Es ist angezeigt, auf die Grundgleichungen der Fluiddynamik zurückzugreifen. Auch bedarf es einer Verfeinerung der Betrachtungsweise: Die Hydraulik geht von deterministischen Modellvorstellungen aus, was bedeutet, dass sich neue Zustandsgrössen lückenlos, kausal und eindeutig aus schon bestehenden ableiten lassen. Tatsächlich sind jedoch reale Strömungsvorgänge stochastische, von Nichtlinearitäten und Zufälligkeiten geprägte Prozesse, zu deren Beschreibung es der Wahrscheinlichkeits- und Stabilitätsbetrachtungen bedarf.

Obwohl die für den Beschrieb des dynamischen Strömungsfeldes massgebende Navier-Stokes'sche Gleichung seit der ersten Hälfte des neunzehnten Jahrhunders bekannt ist, sind geschlossene Lösungen nur in Ausnahmefällen

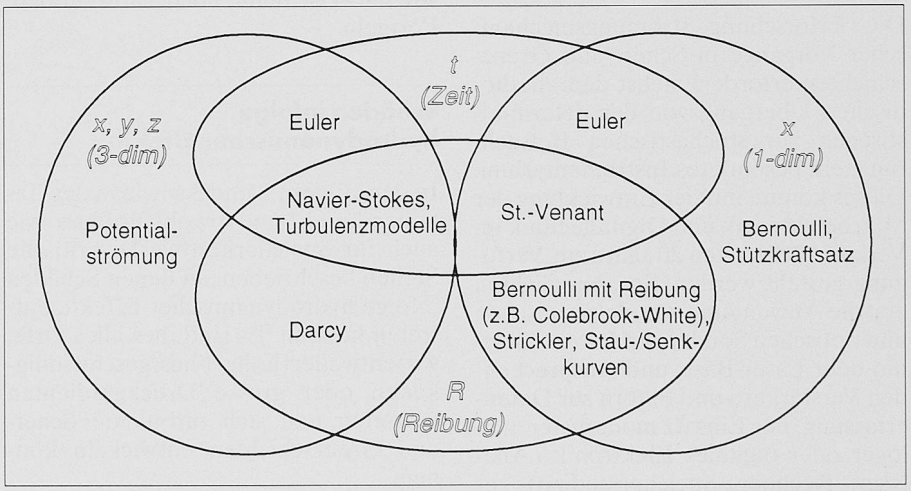

Bild 1. Wichtige Gleichungen der Fluiddynamik und Hydraulik, dargestellt in den Einflussfeldern der Hauptparameter: Raum («x, y, z», Berücksichtigung dreidimensionaler Verhältnisse, gegenüber «x», eindimensionale Betrachtung in Fliessrichtung), Zeit («t») und Zähigkeit («R», Berücksichtigung der Reibungseinflüsse)

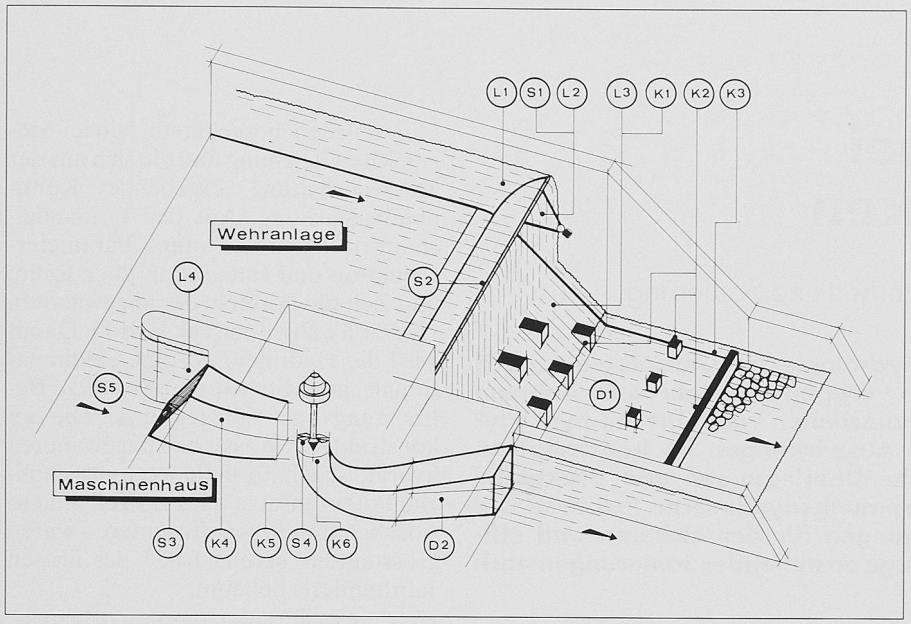

Bild 2. Stellen möglicher Schäden infolge fluiddynamischer Belastungen an Flusskraftwerken. L = Lufteintrag, K = Kavitation, D = dynamische Druckschwankungen, S = Schwingungen (vgl. Tabelle 1)

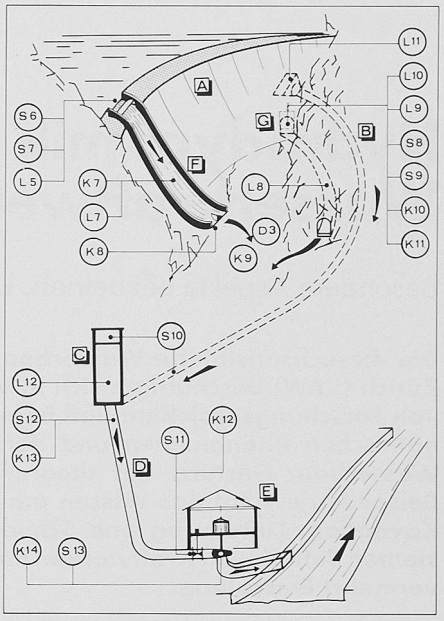

Bild 3. Stellen möglicher Schäden infolge fluiddynamischer Belastungen an Speicherkraftwerken (vgl. Tabelle 2). A: Stauhaltung, B: Triebwasserfassung und Druckstollen, C: Wasserschloss, D: Druckleitung, E: Zentrale, F: Hochwasserentlastung, G: Grundablass

möglich. Auch eine numerische Lösung der Gleichung fällt heute noch schwer, da einerseits die Anzahl der Variablen gross und die Formulierung der Randbedingungen schwierig ist und anderseits die koherante Darstellung des Strömungsfeldes eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung und damit einen immensen Rechenaufwand verlangt. Für die dynamische Berechnung eines realen, zähigkeitsbehafteten Fluids sind zudem sogenannte Turbulenzmodelle notwendig, die die Energiedissipation in der Strömung und entlang der Strömungsberandung charakterisieren und so eine Darstellung der Wirbelstrukturen in Grenz- und Scherschichten erlauben. Diese Turbulenzmodelle müssen mittels Eichdaten aus physikalischen Modellversuchen und aus Naturmessungen überprüft werden.

Die Erforschung strömungsmechanischer Vorgänge in Scher- und Grenzschichten erfordert, nebst dem methodischen Übergang von der deterministischen zur stochastischen Betrachtung, ein besonderes Instrumentarium. Dieses konnte mit der Entwicklung der Mikroelektronik und Digitaltechnik im Verlaufe der letzten 20 Jahre zur Verfügung gestellt werden. So ermöglichten erst die Anwendung von elektronischen und optischen Sonden auf Piezo-, Silizium oder Laser-Basis und entsprechenden Verstärkern und Filtern zur Datenerfassung, der Einsatz modernster analoger oder digitaler Elektronik (Analyser, Rechner, Speichermedien) zur Datenregistrierung und -auswertung sowie der Zugriff auf leistungsfähige Computer zur Berechnung numerischer Simulationen einen vertieften Einblick in Struktur und Dynamik von Strömungsfeldern.

Es ist nun anzunehmen, dass in die Projektierung des Grossteils der Wasserkraftanlagen, die vor 1965 ÷ 1970 realisiert wurden, nur beschränkte Kenntnisse über das dynamische Verhalten des Wassers eingeflossen sind. Vor allem das Wissen um die Strömungsgrössen in abgelösten Zonen, in Scher- und Grenzschichten zwischen Wasser und Luft bzw. Wasser und Berandungszonen konnten noch kaum Anwendung in der Praxis finden. Die in der Einleitung erwähnte Bemerkung von Arthur & Jabara erscheint unter diesem Licht verständlich: Für die Berücksichtigung von Prozessen wie Kavitation, Lufteintrag und Schwingungen fehlten zwangsläufig theoretische Kenntnisse und – wie teilweise heute noch – anwendbare Formeln.

Schäden infolge hydrodynamischer Effekte

In den Bildern 2 und 3 sowie in den Tabellen 1 und 2 sind sowohl für Fluss- wie auch für Speicherkraftwerke kritische Stellen beschrieben, an denen Schäden infolge hydrodynamischer Effekte auftreten können. Es sind dies alles Orte, wo entweder hohe Fliessgeschwindigkeiten oder grosse Druckgradienten auftreten und sich turbulente Scher- und Grenzschichten entwickeln können.

Dank der generell von solidem Sicherheitsdenken geprägten Planung und Realisierung, der im internationalen Vergleich sehr sorgfältigen Ausführung und dem guten Unterhalt sind die Wasserkraftanlagen in der Schweiz bis anhin von grösseren Schadensereignissen verschont geblieben. Schäden, die nur die Funktionstüchtigkeit von einzelnen Anlageteilen beeinträchtigen, wie namentlich solche infolge hydrodynamischer Effekte, werden allerdings kaum publik. Bei der Detektion und Sanierung von Schadensfällen lässt sich eine gewisse Qualifizierung feststellen: Anlageteile, an denen Schäden zu Betriebsstörungen und damit zu unmittelbaren Produktionsminderungen führen, werden im allgemeinen regelmässig überprüft und erkannte Problemstellen baldmöglichst saniert. So zum Beispiel das Triebwassersystem und vorallem die hydraulischen Maschinen. Bei den Kontrollen und beim Unterhalt von Anlageteilen, welche nur selten oder in Notfällen in Betrieb genommen werden müssen oder über deren Funktionstüchtigkeit praktisch keine Angaben vorliegen, fehlt hingegen manchmal die Sensibilität für mögliche Schadensszenarien (Grundablässe, Hochwasserentlastungen). Typisch für die strömungsmechanischen Prozesse in diesen Anlageteilen sind die Latenz bezüglich der Schadenswirksamkeit, die komplexen, dynamischen Strömungsverhältnisse und die nicht offensichtliche Betriebsbeeinträchtigung.

Dazu drei Beispiele:

☐ Die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit von Grundablässen be-

Ort (Bezeichnungen siehe Bild 2)	*Lufteintrag, Belüftung, Gemischtabfluss*	*Kavitation, Kavitationserosion, Druckschwankungen*	*Schwingungen*
Flusskraftwerke			
Wehranlage	*L1:* Lufteintrag in Eckwirbel, Pulsationen des Ausflusses *L2:* Luftaufnahme des Überfallstrahls *L3:* Lufteintrag entlang Fliessweg über den Wehrrücken: vergrösserte Abflusstiefen	*K1:* Auf langen Schussrinnen und Wehrrücken *K2:* An Störkörpern, Strahlteilern und hinter Stufen auf dem Wehrrücken und im Tosbecken *K3:* In der Fusszone von Trenn- und Leitwänden (Eckwirbel) *D1:* Beschädigung des Tosbeckenbodens durch Druckschwankungen im Wechselsprung	*S1:* Schwingungen von Überfallstrahlen infolge schlechter Belüftung, mit oder ohne Koppelung mit einem elastischen Wehrverschluss (Klappe, Trommel usw.) *S2:* Schwingungen unter- oder gleichzeitig unter- und überstömter Wehrschützen infolge Strömungsinstabilität (Elastische Biegeschwingungen und Starrkörperschwingungen in den Aufzugsorganen)
Maschinenhaus	*L4:* Lufteintrag über Eckwirbel in die Einlaufspirale, Pulsationen	*K4:* In den Eckzonen der Einlaufspirale *K5:* An Laufrad- und Stützschaufeln sowie an der Panzerung auf Höhe Laufrad *K6:* Wirbelzopfbildung im Nachlauf der Laufradnabe *D2:* Druckschwankungen infolge ungünstiger Strömungsführung im Saugrohr (Ablösungen, Rückströmungen)	*S3:* Schwingungen der Einlaufrechen (Stäbe und ganze Rechenfelder) *S4:* Schwingungen der Laufrad- und Stützschaufeln infolge Strömungsinstabilität *S5:* Fluidschwingungen im Einlaufbereich

Tabelle 1. Mögliche Schadensfälle infolge fluiddynamischer Belastungen an Flusskraftwerken. Die Bezeichnungen beziehen sich auf Bild 2

schränkt sich zumeist auf die Kontrolle der Huborgane. Die Schützen werden bis vielleicht 5% der Gesamtöffnung aufgefahren und dann wieder geschlossen. Wie nachfolgend dargestellt wird, ist der Ausfluss bei derart kleinen Öffnungen versprüht und besitzt kein Schadenspotential hinsichtlich Kavitation, Erosion und Pulsationen. Zudem werden diese Prozesse erst über die Dauer schadenswirksam und zeigen dann ein nicht konservatives Verhalten (einmal entstandene Kavitationsschäden z.B. verursachen bis zu einem gewissen Grad noch stärkere Kavitationserosion). Mit dem kurzen Betätigen der Regulierorgane kann deshalb die längerwährende, z.B. für das Absenken einer Stauhaltung notwendige Funktionstüchtigkeit des Grundablasses nicht geprüft werden.

☐ Gewisse Wehrschützen, vorallem älterer Bauart mit relativ breiten Eichenbalken als Sohldichtung, zeigen in beschränkten Betriebsbereichen eine Schwingungstendenz. Im allgemeinen lassen sich diese Bereiche problemlos durchfahren, Sanierungsmassnahmen oder Detailuntersuchungen sind oftmals nicht notwendig. Werden jedoch Änderungen am Wehrreglement oder z.B. an den Dichtungen vorgenommen, Massnahmen, die Einfluss auf die Systemdynamik haben, so können Schwingungszustände auftreten, die nicht mehr einfach kontrollierbar sind und die die Betriebsfähigkeit des Organs ernsthaft gefährden.

☐ Oftmals werden ungünstige Strömungsverhältnisse in Turbineneneinläufen und Saugrohren (ungleichmässige Geschwindigkeitsverteilungen und starke Geschwindigkeitsschwankungen, Ablösungen, Rückströmungen) solange in Kauf genommen, als die Turbinen keine Betriebseinschränkungen erfahren. Eine integrierte Betrachtung der Strömungsverhältnisse an den Turbinen (Maschinenseite) und im Triebwassersystem (Bauseite) könnte aber eine Möglichkeit der Leistungssteigerung darstellen [3].

Bedeutung in der Zukunft

In den nächsten Jahren und Jahrzehnten steht in der Schweiz eine immer grösser werdende Zahl von Konzessionserneuerungen von Kraftwerksanlagen bevor. Da nun die gesellschaftliche Akzeptanz von Energieproduktionsanlagen aufgrund der früher weniger berücksichtigten ökologischen Nebenwirkung geschwunden ist, ferner eine allgemeine Skepsis gegenüber technischem und technologischem Fortschritt besteht und schliesslich die Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger aus ökologischen und sicherheitstechnischen Aspekten hinterfragt wird sowie die Anwendung von Alternativenergien wie Wind und Sonnenlicht heute noch ökonomisch unbefriedigend ist, erhält die wirtschaftlich optimale Nutzung des vorhandenen Potentials an Wasserenergie unter Berücksichtigung höchster Anforderungen an Sicherheit und Funktionstüchtigkeit noch vermehrte Bedeutung. Die Berücksichtigung heutiger Kenntnisse über die komplexen dynamischen Strömungsverhältnisse in Wasserkraftwerken kann einen Beitrag zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit und der Sicherheit der Anlagen leisten.

Es stellt sich jedoch die Frage, wie weit es für Besitzer, Betreiber und Projektierende von Wasserkraftwerken möglich und rentabel ist, die Anwendungen von technischem Spezialwissen in ihren Anlagen zu implementieren. Tatsache ist, dass bei Sanierung und Umbau von Kraftwerken die Lösung politischer, rechtlicher und wirschaftlicher Probleme im Vordergrund steht. Der technischen Feinarbeit kommt oft etwas weniger Gewicht zu. Auch ist das Gros der technischen Aufgaben ohne Spezialwissen zu bewältigen, was rückwirkend zur Folge hat, dass dieses Wissen in der Praxis zum Teil wenig Eingang findet. Eine Zusammenarbeit der Projektierenden und Ausführenden mit spezialisierten Instituten der Hochschulen ist

Ort (Bezeichnungen siehe Bild 3+4)	*Lufteintrag, Belüftung, Gemischtabfluss*	*Kavitation, Kavitationserosion, Druckschwankungen*	*Schwingungen*
Speicherkraftwerke			
Hochwasserentlastung	*L5:* Pulsierende Ausflüsse infolge Lufteintrag in Eckwirbel beim Wehr bzw. beim Einlauf *L6:* Schussrinnen in Stollen: Unterdrücke durch ungenügende Belüftung des Abflusses, Volllaufen des Querschnitts mit Gemischabfluss, Pulsationen *L7:* Schussrinnen offen: erhöhte Abflusstiefe infolge Lufteintrag, Überströmen der Leitwände	*K7:* Schussrinnen, offen oder in (Freispiegel-)Stollen: entlang Sohle (u. bei neg. Gefällsänderungen, Querschnittsänderungen und Unebenheiten) oder am Anschluss zu Seiten- oder Trennwänden (Eckwirbel) *K8:* Sprungschanzen: an Strahlteilern *K9:* Tosbecken: An Störkörpern, Strahlteilern und hinter Stufen *D3:* Tosbeckensohle: Schäden von Druckschwankungen im Wechselsprung	*S6:* Schwingungen von Überfallstrahlen infolge schlechter Belüftung, mit oder ohne Koppelung mit einem elastischen Wehrverschluss (Klappe, Trommel) *S7:* Schwingungen von Wehr- und Tiefschützen infolge Strömungsinstabilität (Elastische Biegeschwingungen und Starrkörperschwingungen in den Aufzugsorganen)
Grundablass	*L8:* Abfluss nach den Schützen in (Freispiegel-)Stollen: Unterdrücke durch ungenügende Belüftung des Abflusses, Vollaufen des Querschnitts mit Gemischabfluss, Pulsationen *L9:* Unterdrücke im Mauer-/Schützenkammerbereich bei ungenügender Belüftung *L10:* Betriebliche Auswirkungen der Luftaufnahme (Sog, Lärm)	*K10:* In den sohlennahen Eckzonen bei den Schützen (Eckwirbel), an der Panzerung unterwasserseitig der Schützen und beim Übergang Stahl- zu Betonauskleidung (bei geringer Länge der Panzerung oder hoher Fliessgeschwindigkeit im Betonstollen ist v.a. dieser gefährdet) *K11:* Bei Schützennuten von Gleit- und Rollschützen	*S8:* Schwingungen der Regulier- und Serviceschützen *S9:* Schwingungen von Teilen der Stahlpanzerung bei schlechter Verankerung im Beton
Triebwassersystem	*L11:* Lufteintrag durch Einlaufwirbel *L12:* Lufteintrag infolge zu tiefen Abschwungs im Wasserschloss	*K12:* An Absperr- und Drosselorganen *K13:* Überbelastungen infolge Druckstössen, Wässerschlossschwingungen und Fehlmanipulationen der Regulierorgane	*S10:* Druckstösse und Wasserschlossschwingungen bei Durchflussänderung (Anfachung Fluidresonatoren) *S11:* Strömungsbedingte Schwingungen von Absperrorganen *S12:* Schwingungen freiliegender Druckleitungen
Turbinen		*K14:* An Laufrad- und Leitschaufeln, an der Panzerung, im Nachlauf der Nabe (Francis), an Düsen und Bechern (Pelton)	*S13:* Strömungsbedingte Schwingungen von Turbinenteilen (Laufrad, Leitschaufeln, Becher, Wellen usw.)

Tabelle 2. Mögliche Schadensfälle infolge hydrodynamischer Belastungen an Speicherkraftwerken. Die Bezeichnungen beziehen sich auf Bild 3

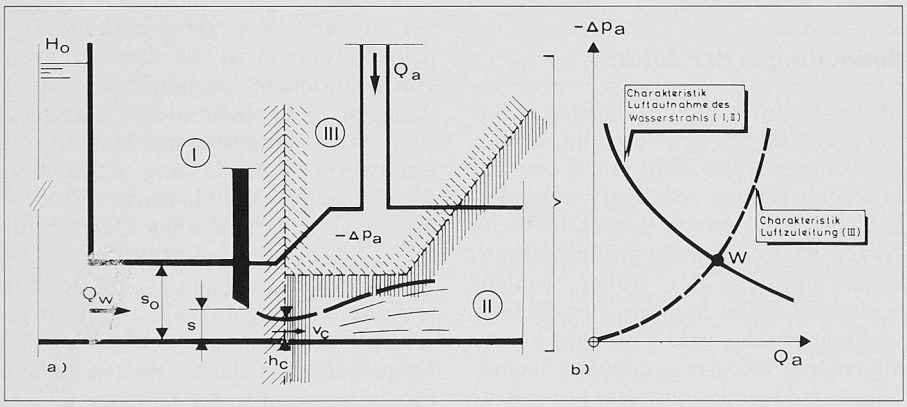

Bild 4. a) Systematische Darstellung eines Grundablasses mit den Hauptparametern und den Einflussbereichen für die Belüftung des Austrittstrahls (vgl. Text); b) Funktionsprinzip der Grundablass-Belüftung, W = Arbeitspunkt der Luftaufnahme

daher zu empfehlen. Die Lösung komplexer Strömungsprobleme kann als Beispiel für einen möglichen und – wie die Erfahrung der VAW zeigt – funktionierenden Wissensaustausch zwischen Hochschule und Industrie gesehen werden.

Belüftung von Grundablässen, Kavitationsgefährdung

Freispiegelabflüsse mit grosser Geschwindigkeit, wie sie oftmals in Grundablassstollen anschliessend an die Regulierorgane vorkommen, erfahren durch die Strömungsturbulenz eine Lufteinmischung von der freien Ober-

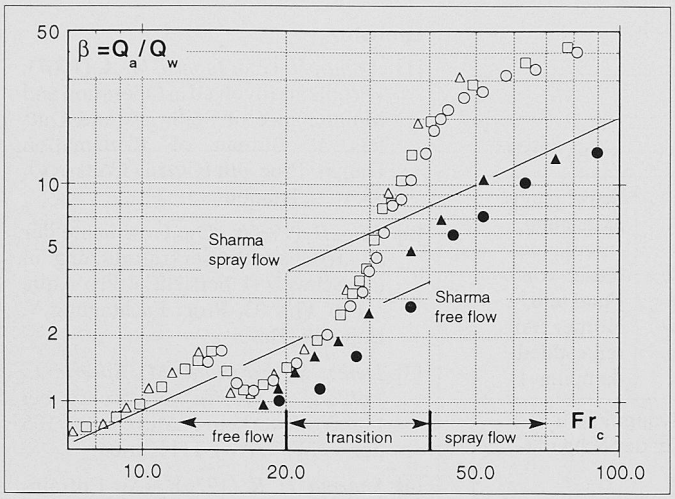

Bild 5. Luftgehalt β der Strömung in Funktion der Froude-Zahl Fr_c an der Vena contracta. Daten von Curnera (verbesserte Belüftung): (●) H_0 = 100.6 m, (▲) H_0 = 153 m; Daten von Panix: (Δ) H_0 = 40 m, (□) H_0 = 45 m, (○) H_0 = 50 m. (–) Berechnungen nach Sharma

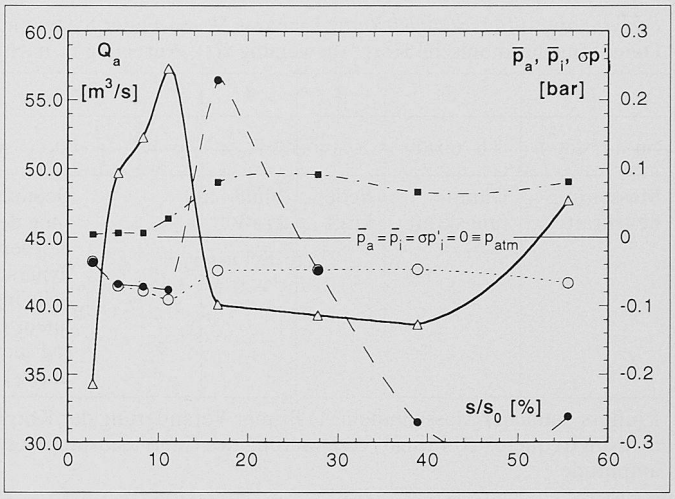

Bild 6. Naturmessungen in der Mischungszone des Grundablasses Curnera: (Δ) Lufteintrag Q_a, (○) mittlerer Luftdruck $\bar{p}_a$, (●) mittlerer Wasserdruck $\bar{p}_i$ und (■) Standardabweichung des Wasserdrucks $\sigma p'_i$ in Funktion der relativen Schützenöffnung s/s_0

fläche her. Da diese Luft über den Fliessweg nur teilweise wieder entmischt und rezirkuliert wird, ist zur Verhinderung grosser Unterdrücke und damit von Kavitation oder Pulsationen eine Luftzuführung im Bereich des Ausflusses durch die Schützen notwendig. Der Belüftungsprozess wird im allgemeinen durch drei Einflussbereiche bestimmt: I. den druckseitigen Bereich strömungsaufwärts der vena contracta (tiefster Punkt der Strömungskontraktion nach der Schütze), II. den Bereich des Freispiegelabflusses, strömungsabwärts der vena contracta und III. den Bereich der Luftzuleitung (vgl. Bild 4a).

Die drei Einflussbereiche definieren die einer bestimmten Grundablassgeometrie und einer bestimmten Betriebseinstellung (z.B. Schützenöffnung, Seewasserstand) zugeordneten Funktionscharakteristika im Durchfluss-Druck-Diagramm und den Arbeitspunkt des Systems (vgl. Bild 4b). Bei vielen Anlagen lassen sich zwei Abflusszustände im Bereich der Mischungszone unterscheiden: Für kleine Öffnungen der Schützen und grosse Froude-Zahlen Fr_c des Ausflusses ($s/s_0 < 6\%$ und $Fr_c > 40$, mit s = effektive und s_0 = maximale Schützenöffnung, $Fr_c = v_c/(g.h_c)^{1/2}$, v_c = Fliessgeschwindigkeit und h_c = Abflusstiefe an der vena contracta, g = Erdbeschleunigung) ist der Abfluss völlig versprüht (spray flow). Für $s/s_0 > 0.12$ und $Fr_c < 20$ wird der Ausflussstrahl dichtschiessend und nur noch von der Oberfäche her belüftet (free flow).

Die heute verwendeten Formeln für Luftgehalt der Strömung $\beta = Q_a/Q_w$ mit Q_a = eingetragener Luftabfluss, Q_w = Wasserdurchfluss, schreiben β explizit als Funktion von Fr_c [4] oder berücksichtigen noch zusätzlich die Charakteristik der Luftzuleitung [5]. Diese Beschränkung auf die Einflussbereiche I und II. verunmöglicht die Bestimmung des Arbeitspunkts der Luftaufnahme (vgl. Bild 4b), was die Beurteilung eines Grundablasses hinsichtlich seiner Gefährdung durch Unterdrücke, Kavitation und Pulsationen erschwert. In den Bildern 5 und 6 sind Resultate von Naturmessungen an den Grundablässen der Staumauern Curnera und Panix dargestellt. Weder der Luftbedarf β in Funktion von Fr_c (vgl. Bild 5), noch der Verlauf der Luftmenge Q_a und der mittleren Luftdrücke $\bar{p}_a$ in Funktion der Schützenöffnung können mit den heutigen Formeln zuverlässig ermittelt werden. Zudem ist für die Abschätzung der Kavitationsgefahr die Verteilung und die Grösse der mittleren Wasserdrücke $\bar{p}_i$ und der Wasserdruckschwankungen p'_i bedeutsam (siehe Kasten). Aus Bild 6 geht hervor, dass sowohl $\bar{p}_i$ wie auch die Standardabweichung von p'_i ($\equiv \sigma p'_i$) stark mit der Schützenöffnung variiert, was sich ebenfalls nicht mit der klassischen Mittelwerts-Hydraulik erklären lässt.

Da also mit den heute angewandten Ansätzen weder die Strömung noch der Lufteintrag bei Grundablässen hinreichend beschrieben werden kann, muss für kohärente Angaben über die fluiddynamischen Prozesse auf Anhaltsgrössen aus Naturmessungen oder auf Modellversuche zurückgegriffen werden. Obwohl letztere im Bereich der Austauschprozesse Luft-Wasser relativ engen Grenzen der Ähnlichkeitsgesetze unterliegen, erlauben sie die momentan zuverlässigsten Aussagen.

Die Kavitationsgefährdung kann über den Vergleich der Kavitationszahl σ_i der Strömung an der Stelle i mit der kritischen Kavitationszahl σ_{krit} der Berandungszone an derselben Stelle ermittelt werden. Ist $\sigma_i < \sigma_{krit}$ so kann Kavitation entstehen. Es schreibt sich zum Beispiel:

$$\sigma_i = \frac{P_{atm} + \bar{P}_i - P_v}{1/2 \cdot \rho \cdot v_i^2}$$ Kavitationszahl der Strömung

$$\sigma_{krit} = K \cdot \frac{\sqrt{\overline{p'^2_i}}}{1/2 \cdot \rho \cdot v_i^2} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{für praktische} \\ \text{Anwendungen} \end{array} \right\} \sigma_{krit} \cong 4 \cdot \lambda$$ kritische Kavitationszahl von Oberflächen mit verteilter Rauhigkeit

mit p_{atm} = Atmosphärendruck, $\bar{p}_i$ statischer Wasserdruck an der Stelle i relativ zu p_{atm}, p_v = Dampfdruck und ρ = Dichte des Wassers, v_i = Strömungsgeschwindigkeit und p'_i = Druckschwankungen bei i, K = Koeffizient, der die Verteilung von p'_i und damit die Grenzschichtturbulenz beschreibt ($5.3 < K < 11.4$), λ = Reibungsbeiwert nach Colebrook-White [6],[7]. σ_i berücksichtigt den mittleren Druck und den Dampfdruck der Strömung während σ_{krit} die in der Grenzschicht entlang der Strömungsberandung entstehenden Druckschwankungen abdeckt. σ_{krit} ist für diskrete und verteilte Oberflächenunebenheiten in der Literatur gut dokumentiert. Angefügt sei, dass mit der Abschätzung der Kavitationsgefährdung über den Vergleich von σ_i und σ_{krit} keine Angaben über die zeitliche Entwicklung und die örtliche Ausdehnung der möglicherweise eintretenden Kavitationserosion gemacht werden können.

Schwingungsdifferentialgleichung: Lineares Masse-Feder-System mit viskoser Dämpfung, harmonische Körperbewegung x(t), Anregung F_w nach [9]:					
1	*2*	*3*	*4*	*4a*	*4b*
$m \cdot (d^2x/dt^2)$	$+b \cdot (dx/dt)$	$+c \cdot x$	$=F_W =$	$\rho \cdot L^2 \cdot \frac{v^2}{2} \cdot (C_{Fm} \cdot \sin \varpi t$	$+C_{Fd} \cdot \cos \varpi t)$
Massenträgheitskraft	Dämpfungskraft	Federkraft	Fluidkraft	Beeinflussung der Körperdynamik & Schwingfrequenz (Anteil «added mass»)	Schwingungsanfachung, Energieaustausch von Fluid und Körper (Anteil «added damping»)
Einfluss baulicher Massnahmen: *A)* Primär Veränderung der Körperdynamik, d.h. der Schwingfrequenz, *B)* Primär Veränderung des Energieaustausches, d. h. der Schwingamplitude					
1 ⇒ A	*2 ⇒ B*	*3 ⇒ A*	*4 = 4a & 4b ⇒ A & B*		
– Änderungen an der Schützenmasse	– Änderung der Dichtungen oder der Führungen	– Änderungen an den Huborganen – Versteifungen an der Schütze	– Geometrische Änderungen an den umströmten Bauteilen, v.a. Änderung an Stellen, wo die Strömung ablöst (Sohllippe, Überfallkante) – Änderungen der Wasserstände (Wehrreglement)		

Tabelle 3. Darstellung der Schwingungsdifferentialgleichung und der Beeinflussung der Schwingungsdynamik von Schützen durch bauliche Änderungen (Definition der Variablen siehe Text)

Schwingungen von Wehr- und Tiefschützen

Strömungsbedingte Schützenschwingungen treten als Folge von Druckschwankungen in der Grenzschicht entlang der Strömungsberandung und dort zumeist infolge von Strömungsinstabilitäten auf. Sie können entsprechend der dominanten Anregungsmechanismen folgendermassen klassifiziert werden [8]:

☐ Fremdanregung (FA): Erzwungene Schwingungen infolge der Strömungsturbulenz im Ober- oder Unterwasser der Schütze.

☐ Instabilitätsinduzierte Anregung (IIA): Selbsterregte Schwingungen infolge der Instabilität von Scher- und Grenzschichten im Bereich von Strömungsablösungen. Die Anregung kommt entweder ausschliesslich durch Strömungsinstabilitäten (Wirbelanregungen, aufprallende Scherschichten) zustande oder die Instabilität wird durch die Schützenbewegung oder einen Fluidresonator (z.B. Wellen) gesteuert.

☐ Bewegungsinduzierte Anregung (BIA): Schwingungen, die dann auftreten, wenn die Schützenbewegung die Strömungsverhältnisse verändert und dadurch fluktuierende Fluidkräfte verursacht. Die wichtigsten Mechanismen sind das «Galloping» und die durchflussgekoppelten Schwingungen bei kleinen Spalten zwischen Resonator und fester Strömungsberandung (pressshut-Mechanismen).

Näherungsweise lässt sich ein guter Teil der Schwingungsphänomene mit dem Modell des linearen Masse-Feder-Systems mit viskoser Dämpfung behandeln und damit als harmonische Schwingungen mit der Kreisfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (f = Schwingfrequenz) und der Amplitude der Körperbewegung $x_0(t)$ darstellen (Tab. 3). Die Anfachungskraft der Strömung F_w kann aufgegliedert werden in einen Anteil, der in Phase mit der Körperbewegung x(t) wirkt und damit die Resonatordynamik (v.a. die Schwingfrequenz) verändert, aber keine Energie in das System einträgt (C_{Fm}) sowie einen Anteil 90° phasenversetzt zur Körperbewegung, der effektiv Arbeit am System leistet (C_{Fd}) [9]. Die Koeffizienten C_{Fm} und C_{Fd} sind unter anderem Funktionen der Parameter, die im Kästchen auf der folgenden Seite aufgeführt werden. Darin bedeuten f_i = Schwingfrequenz f ≙ Wirbelablösefrequenz f_s oder Eigenfrequenz $f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot (c/m)^{1/2}$; c = Federsteifigkeit; m = Schützenmasse; $\bar{v}$ = mittlere Strömungsgeschwindigkeit; v' = Geschwindigkeitsschwankung; L = Bezugslänge, z.B. Sohllipppendicke d, Einstauhöhe H_i oder Schützenspannweite W; m_r = reduzierte Masse = $m/\rho L^3$; ρ = Dichte und υ = kinematische Zähigkeit des Wassers; β = viskoses Dämpfungsmass = $b/(2 \cdot m \cdot \omega)$; b = Dämpfungskonstante und s = Schützenöffnung. Die Schwierigkeit der Behandlung von Schwingungsphänomenen liegt nun darin, dass es nur wenige deterministische und der praktischen Anwendung im Wasserbau genügende Ansätze zur Bestimmung der Anfachungskräfte F_w (bzw. der Koeffizienten C_{Fm} und C_{Fd}) gibt. Die Menge der Einflussparameter ist gross, und F_w hängt nicht linear von diesen Parametern ab. Zudem ist die Reduktion der Betrachtung auf bloss einen Bewegungsfreiheitsgrad oftmals ungenügend, da eine räumliche Struktur mehrdimensionalen Schwingungsformen unterliegt. Weitergehendes im Gebiet

Literatur

[1] *Arthur, H. G. & Jabara, M. A.* (1967); «Problems Involved in Operation and Maintenance of Spillways and Outlets at Bureau of Reclamation Dams»; Proc. 9th ICOLD Congr. , Q. 33, R. 5, Istanbul.

[2] *Gilg, B.* (1983); «Die Geschichte der elektrischen Wasserkraftnutzung in der Schweiz (Übersicht)», Pro Aqua – Pro Vita 83, Proc. Fachtagung V, Band 9E, Basel.

[3] *Deniz, S., Bosshard, M., Speerli, J., Volkart, P.* (1990); «Saugrohre bei Flusskraftwerken», Mitteilung 106 der VAW, VAW-ETH Zürich.

[4] *Sharma, H. R.* (1976); «Air-Entrainment in High Head Gated Conduit»; Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 102, HY11, pp. 1629–1646.

[5] *Rabben, S. L.* (1984); «Untersuchung der Belüftung an Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Massstabseffekten»; Mitteilung 53, Inst. f. Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Germany.

[6] *Falvey, H. T.* (1990); «Cavitation in Chutes and Spillways»; Engineering Monograph No. 42, USBR, Denver.

[7] *Arndt, R.E.A., Holl, J.W., Bohn, J.C., Bechtel, W.T.* (1979); «Influence of Surface Irregularities on Cavitation Performance»; Journal of Ship Research; Vol. 23, No. 3, pp. 157–170.

[8] *Naudascher, E. & Rockwell, D.* (1993); Flow-induced Vibrations – an Engineering Guide, Balkema, Rotterdam (to be published)

[9] *Sarpkaya, T.* (1979); «Flow-induced Oscillations», Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 46, No. 2.

[10] *Naudascher, E. & Rockwell, D.* (editors) (1979); Practical Experiences with Flow-induced Vibrations; IAHR/UTAM Symposium Karlsruhe, Springer.

[11] *Kolkman, P.A.* (1976); «Flow-induced Gate Vibrations»; Delft Hydraulics Laboratory, Publication No. 164.

[12] *Jaeger, Ch.* (1949); Technische Hydraulik, Verlag Birkhäuser, Basel, p. 322.

$$\left\{\begin{array}{c} C_{Fm} \,\&\, C_{Fd} \\ \text{und daraus} \\ \omega \,\&\, x_0(t) \end{array}\right\} = F \left\{\begin{array}{lll} V_r & = \bar{v}/L \cdot f_i & \text{reduzierte Geschwindigkeit} \\ Sc & = 2m_r\beta & \text{Scrouton-Zahl} \\ Re & = \bar{v} \cdot L/\upsilon & \text{Reynolds-Zahl} \\ Tu & = (\overline{v'^2})^{1/2}/\bar{v} & \text{Turbulenzgrad} \\ s/d & = & \text{relative Schützenöffnung} \\ s/H_i & = & \text{relative Einstauhöhen} \end{array}\right\}$$

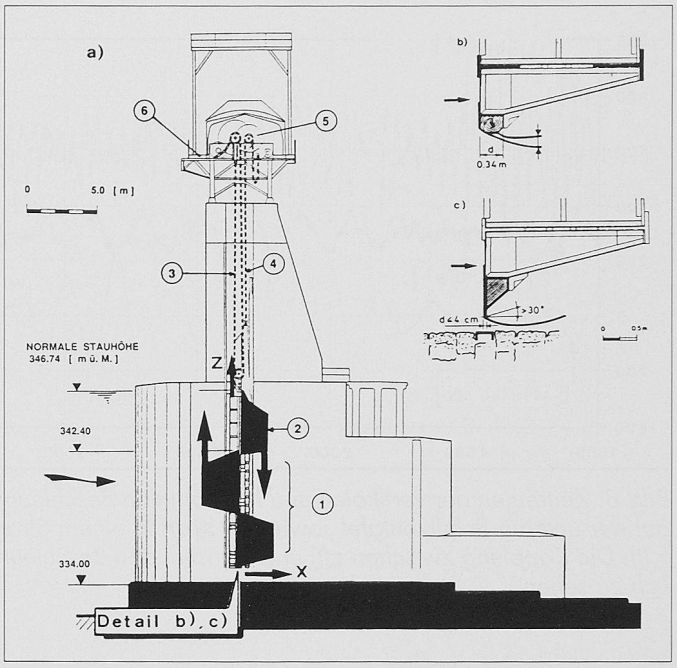

Bild 7. a) Schnitt durch die Wehröffnung und die Schützen in Eglisau: (1) untere Schützentafel, (2) obere Schützentafel, (3) & (4) Aufzugsketten, (5) Windwerke, (6) Dienststeg; b) heutige Geometrie der Sohllippe; c) mögliche schwingungsmindernde Abänderung der Sohllippe

strömungsbedingter Schwingungen von Schützen ist z.B. in Ref. [8] bis [11] zu finden. In der Tabelle 3 ist anhand der Schwingungsdifferentialgleichung dargestellt, inwiefern bauliche Massnahmen, die bei Wehrsanierungen getroffen werden, auf die Dynamik des Systems einwirken. Diese Massnahmen lassen sich wie folgt umschreiben:

☐ Mittels geometrischer Änderungen in den Zonen, wo die Strömung sich ablöst oder bereits abgelöst ist (Sohllippe, Überfallkante), kann die Anfachungskraft F_w vermindert werden. So ist zum Beispiel an der Sohllippe ein klarer Ablösepunkt zu schaffen und anschliessend sind die weiter unterwasserseitigen Schützenteile möglichst weit von der freien Scherschicht wegzuführen (Kol. 4).

☐ Mittels konstruktiven Massnahmen (v.a. Versteifungen) kann verhindert werden, dass kleine Bewegungen der Schütze aufgrund des dadurch veränderten Strömungsfeldes zu grossen Durchfluss- und Druckschwankungen führen (Gefahr von Galloping- und press-shut-Anregung) (Kol. 3 und 4).

☐ Durch Anbringen von Versteifungen am Schützenkörper oder Änderungen an den Huborganen werden die Federsteifigkeiten geändert, womit zum Beispiel die Eigenfrequenzen des Systems gegenüber den gefährdenden Wirbelablösefrequenzen (Anregungsmechanismus IIA) verstimmt werden können (Kol. 3).

☐ Durch Erhöhung der Reibung auf Führungsbahnen und -nuten (z.B. mittels vorgespannter Dichtungen) kann die strukturelle Dämpfung des Systems vergrössert und damit eine Schwingungstendenz vermindert oder unterdrückt werden (Kol. 2).

Wichtig ist, dass die im Rahmen von Umbauten und Sanierungen vorgenommenen Änderungen stets und für alle Betriebszustände zur Verminderung einer potentiellen oder vorhandenen Schwingungsgefährdung beitragen. Der Gefahr einer Verschlimmbesserung kann durch die detaillierte Analyse möglicher Anfachungsmechanismen begegnet werden.

Beispiel Wehrschütze Eglisau

Der Abfluss durch die Wehranlage wird durch Doppeltafelschützen mit einer Stauhöhe H_0 von 12.74 m und einer lichten Weite von 15.5 m reguliert (vgl. Bild 7). Bei einer Öffnung der unteren Schütze von ca. 36 cm ($s_u/d \approx 1.1$, d = 34 cm) und gleichzeitiger Öffnung der oberen Schütze zwischen 0.9 m und 2.0 m wurden Schwingungen der Schütze in Richtung der Aufzugsorgane (Starrkörperschwingungen quer zur Strömungsrichtung) und in Biegerichtung der Hauptträger (Biegeschwingungen in Strömungsrichtung) festgestellt (Tab. 4). Die Anregung ist auf instabile Ablösungen am Sohlbalken (vgl. Bild 7b) zurückzuführen (Mechanismus IIA). Durch das Absenken der oberen Schütze wird die Reibung zwischen den Schützen und in den Führungsnuten vermindert sowie die Bewegungsfreiheit des Systems vergrössert. Dies ermöglicht eine Steuerung der Ablösungen durch die Schützenbewegung. Der Schwingungsbereich konnte ohne Gefährdung des Tragwerks durchfahren werden. Eine Änderung der Sohllippengeometrie entsprechend Bild 7c könnte die Anfachung verhindern.

In Bild 8 sind die vertikalen und horizontalen Beschleunigungen $\ddot{z}_0(t)$, $\ddot{x}_0(t)$ der unteren Schützentafel sowie die Kraft F_{c0} in einer Aufzugkette in Funktion der Zeit eingezeichnet. Die Überlagerung von vertikalen und horizontalen Schwingungen geht deutlich hervor. In den Bildern 9a und 9b sind die aus den gemessenen Signalen berechneten Anfachungskoeffizienten C_{Fm} und C_{Fd} in Funktion der reduzierten Geschwindigkeit V_r und der Öffnung der oberen Schütze aufgezeichnet. Die maximale, energieeintragende Anfachung C_{Fd} geschieht bei vernachlässigbarem Einfluss der «added mass» ($C_{Fm} \approx 0$) und damit praktisch bei der Eigenfrequenz der Schütze. Mittels C_{Fm} und C_{Fd} lässt sich der schwingungsgefährdete Bereich gut abschätzen.

	Vertikale Starrkörperschwingungen z(t)	Horizontale Biegeschwingungen x(t)
f_z, f_x	4.6 Hz ÷ 5.5 Hz	22.2 Hz ÷ 21.1 Hz, Kopplung mit 5. bzw. 4. Harmonischen von z(t)
V_{rz}, V_{rx}	7.5 ÷ 9.0	1.96 ÷ 1.86
$\ddot{z}_0(t)$, $\ddot{x}_0(t)$	0.6 m/s² ÷ 1.9 m/s²	1.9 m/s² ÷ 3.1 m/s²
$F_{c0} = x_0 \cdot c$	10.5 kN ÷ 44.8 kN = 3.5 % ÷ 14.9 % der Beanspruchung aus Eigengewicht	

Tabelle 4. Beschreibung des Schwingungszustandes Eglisau (Variablen siehe Text)

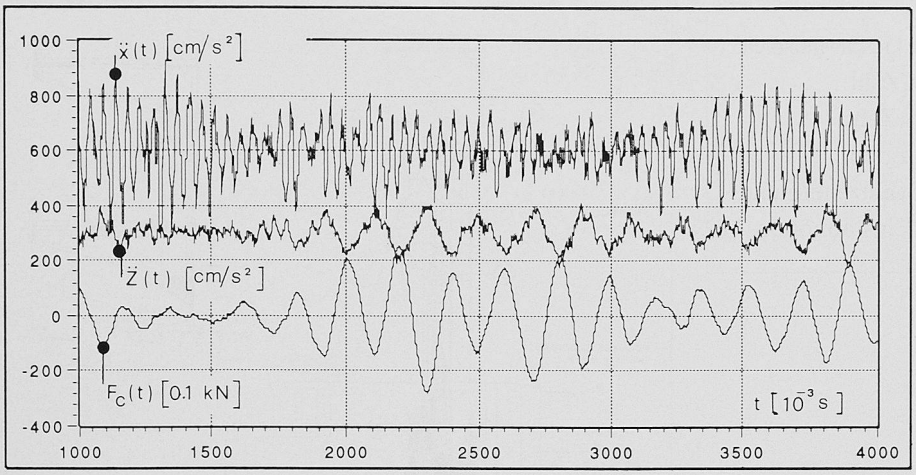

Bild 8. Zeitreihen der vertikalen und horizontalen Beschleunigungen ($\ddot{z}(t)$ und $\ddot{x}(t)$) auf der unteren Schützentafel sowie der Kraft in einem Strang der Aufzugsketten $F_c(t)$. Die Kopplung zwischen z(t) und x(t) ist in den Beschleunigungssignalen deutlich zu sehen

Wehrschütze Klingnau

Nach der Sanierung der Doppelhakenschütze und der Änderung der Sohllippengeometrie (Ersetzen der Eichenbalkendichtung durch eine Stahlschneide, Bild 10) traten bei Überfallhöhen > 1.2 m und gleichzeitigem Hub der unteren Schütze zwischen 0.4 m ÷ 1.0 m Schwingungen des Überfallstrahl und der gesamten Schützenkonstruktion mit einer Grundfrequenz von ca. 1.8 Hz auf. Dominant war die Biege-Torsionsschwingung der oberen Schütze mit maximalen Beschleunigungsamplituden von 1.8 m/s² in vertikaler Richtung. Mechanismus IIA; instabile Ablösung bzw. instabiler Überfallstrahl: Aufgrund der neuen Lippengeometrie bildet sich zwischen den beiden Ablösepunkten am Flansch des U-Profils und der vorderen Kante der Schneide mit der aufgesetzten Dichtung eine freie Scherschicht, was einerseits zu Druckschwankungen auf die untere Schütze, anderseits – durch Erhöhung der Turbulenz – zu grösserer Luftaufnahme des Ausflussstrahls führen kann (vgl. Bild 10c). Letzteres hat zur Folge, dass der Luftraum unter dem Überfallstrahl ungenügend belüftet ist und dadurch das gekoppelte Schwingsystem «Elastische Oberschütze – Wasserstrahl – Luftraum» angeregt wird. Die Schwingungsbeseitigung erfolgte durch das Anbringen seitlicher Kontraktionsbleche auf der Überfallgeometrie. Diese leiten den Überfallstrahl von den Wehrpfeilern weg, was den Luftaustausch und die Entkoppelung des Schwingsystems ermöglicht.

In Bild 11 sind eine Zeitreihe und das dazugehörige Leistungsspektrum der vertikalen Beschleunigung auf der oberen Schützentafel dargestellt. Typisch für Biege-Torsionsschwingungen wie auch für schwingende Überfallstrahlen ist das Auftreten der höheren Harmonischen der Grundfrequenz, ein sogenanntes «multiple-mode behaviour». Bild 12 erlaubt die Abgrenzung des schwingungsgefährdeten Bereichs. Es zeigt die vertikalen Beschleunigungsamplituden der oberen Schütze in Funktion einer auf überströmte Schützen zugeschnittenen reduzierten Geschwindigkeit $V_r = v_0/(f_s \cdot H_f)$ mit v_0 = Strömungsgeschwindigkeit des Überfallstrahls am Absprungpunkt, f_s = Grundfrequenz der Schwingung und H_f = freie Fallhöhe des Überfallstrahls.

Schlussfolgerungen

Anhand eines kurzen Abrisses der Geschichte der Wasserkraftanlagen in der Schweiz und der Entwicklung der hydrodynamischen Forschung wurde dargelegt, dass mancherorts nur beschränkte Kenntnisse über Prozesse wie Schwingungen, Lufteintrag und Kavitation in die Projektierung bestehender Anlagen eingeflossen sind. Einige theoretische Überlegungen und konkrete Auswirkungen wurden anhand praktischer Beispiele dargestellt. Es wurde herausgestrichen, dass hydrodynamische Effekte ein Schadenspotential

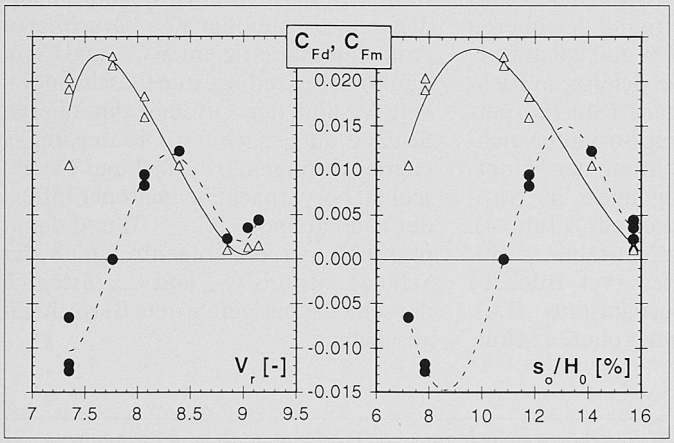

Bild 9. Anfachungskoeffizienten (●) C_{Fm} und (Δ) C_{Fd} für die vertikale Starrkörperbewegung z(t): a) in Funktion der reduzierten Geschwindigkeit V_r, b) in Funktion der relativen Öffnung der oberen Schütze s_0/H_0

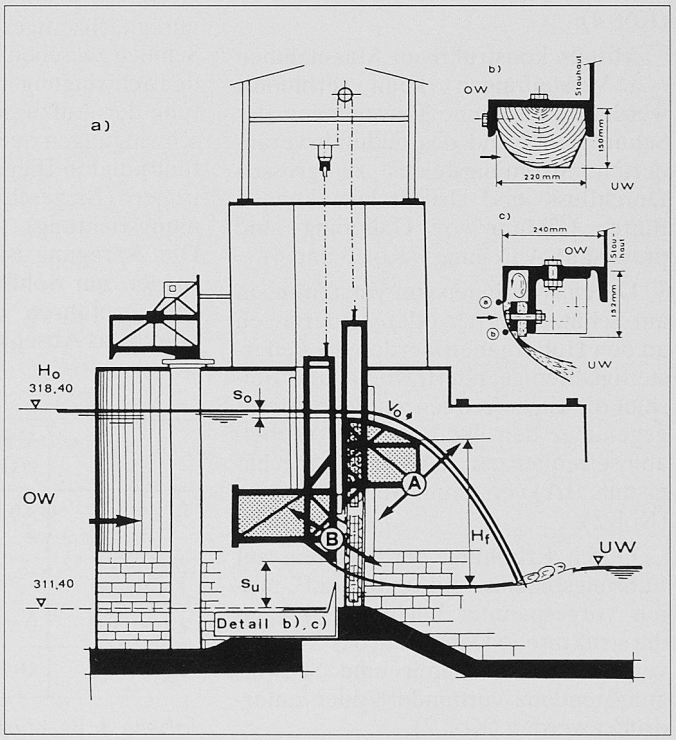

Bild 10. Schnitt durch die Wehrschütze Klingnau mit den Hauptbewegungsrichtungen im Schwingungszustand (bezogen auf die Messpunkte A und B). Details der Schützenlippe: b) vor der Sanierung, c) nach der Sanierung; zwischen den Punkten (a) und (b) kann sich eine Strömungsinstabilität ausbilden

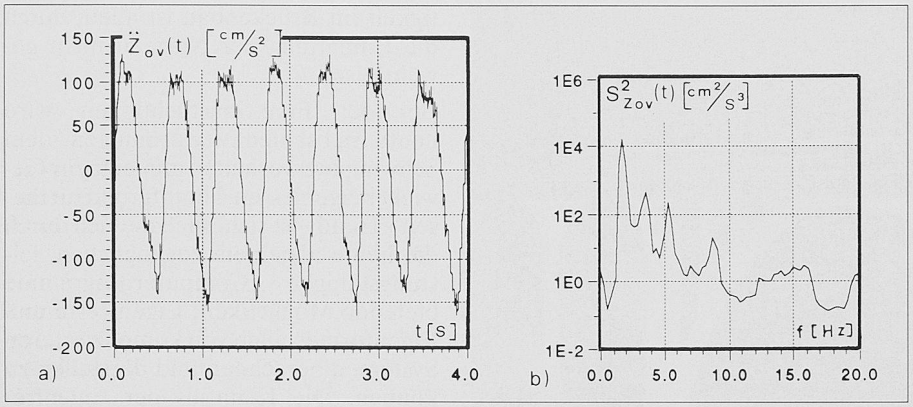

Bild 11. Schwingungszustand, s_0 = 1.6 m, s_u = 0.7 m; a) Zeitreihe der vertikalen Beschleunigung $\ddot{z}_{ou}$ (t) in der Mitte der oberen Schützentafel und b) entsprechendes Leistungsspektrum $S^2_{\ddot{z}_{ou}}$(f)

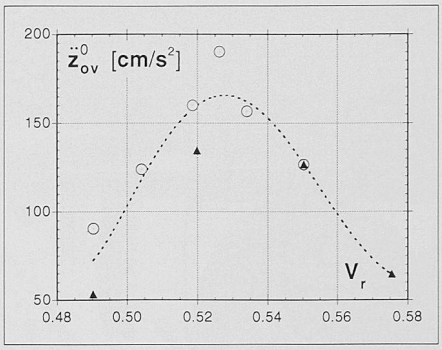

Bild 12. Vertikale Beschleunigungsamplituden in der Mitte der oberen Schützentafel in Funktion der reduzierten Geschwindigkeit V_r (▲) s_u bei 1.0 m fix, s_o variabel, (○) s_0 bei 1.6 m fix, s_u variabel

besitzen, das betriebliche und wirtschaftliche Probleme zur Folge haben kann.

Im Zusammenhang mit der Anwendung komplexen theoretischen Wissens in der Ingenieurpraxis sei Ch. Jaeger zitiert, der 1949 den Umgang mit den Erkenntnissen aus der Frühzeit der hydrodynamischen Forschung wie folgt kommentierte: «Als vor Jahren versucht wurde, in ausführlichen theoretischen Untersuchungen den komplizierten Vorgängen in Wasserschlössern und Druckleitungen näherzukommen, hat es an skeptischen Kommentaren in der Fachpresse nicht gefehlt. Auch heute noch wird manchmal der Gedanke vertreten, man könne auch ohne Theorien und lange Berechnungen Kraftwerke bauen» [12]. Tatsächlich sind die Theorien der Hydrodynamik bis heute noch komplexer und umfassender und die Berechnungen oder notwendigen experimentellen Untersuchungen noch aufwendiger geworden. Die Anwendung in der Praxis ist oftmals schwierig und umständlich.

Wie erwähnt, laufen in der Schweiz in der nächsten Zeit zahlreiche Konzessionen bestehender Wasserkraftwerke aus. Trotz der Komplexität der Theorien ist anzustreben, möglichst grosse Prozesskenntnisse in die Projektierung der Erneuerungen an diesen Kraftwerksanlagen einzubringen. Das Berücksichtigen von aktuellstem Wissen in Betrieb, Unterhalt und Sanierung von Wasserkraftanlagen wird sich aufgrund der genannten wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Aspekte als sinnvoll erweisen. Eine Zusammenarbeit von Hochschule und Kraftwerksbetreibern bietet die Möglichkeit, neuste theoretische Grundlagen in die Realisierung umzusetzen. Die Hochschule kann dazu beitragen, das Wissensdefizit der Praxis bezüglich der Kenntnis komplexer Strömungsprozesse zu mindern, während Anregungen und Aufträge aus der Praxis die Forschungsaktivitäten der Hochschule in Richtung anwendungsrelevanter Probleme führen sollen.

Verdankung: Die Verfasser bedanken sich bei der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) in Baden und bei der Aarewerke AG in Koblenz für die Ermöglichung der Naturuntersuchungen und die Unterstützung bei den Messungen.

Adresse der Verfasser: *P. Billeter,* dipl. Bauing. ETH, wissenschaftlicher Mitarbeiter, und *Dr. P. Volkart,* dipl. Bauing ETH, Abteilungsleiter Wasserbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich, Gloriastrasse 37–39, CH-8092 Zürich.

Brückenentwurf – einst und heute

Verschiedene in letzter Zeit durchgeführte Brückenwettbewerbe haben vor allem unter Ingenieuren Anlass zu teilweise kontroversen Diskussionen über die Anforderungen an den Brückenentwurf und die daran Beteiligten gegeben. Anhand der fünf Projektierungsziele Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit, Wirtschaftlichkeit sowie Umweltverträglichkeit und Ästhetik soll das Thema aufgegriffen und ein Diskussionsbeitrag geleistet werden. Dabei wird insbesondere auf das Projektierungsziel Ästhetik und die Zusammenarbeit zwischen Ingenieur und Architekt eingegangen.

VON THOMAS UND REGULA KELLER-STINGEL, ZUG

Unmittelbares Ziel des Brückenentwurfs ist die Bestimmung des Tragsystems mit Spannweiten, Querschnittsausbildung, Materialisierung und Bauvorgang. Zu beachten sind dabei oft zahlreiche Randbedingungen wie Funktion, Linienführung, Topographie, Geologie, Lichtraumprofile, Umwelt und Wirtschaftlichkeit [1].

Projektierungsziele beim Entwurf bilden die Tragsicherheit (inkl. Ermüdungssicherheit), die Gebrauchstauglichkeit (inkl. Dauerhaftigkeit), die Wirtschaftlichkeit, die Umweltverträglichkeit sowie die Ästhetik. Anhand dieser fünf Projektierungsziele werden Entwurfsvarianten erarbeitet, beurteilt, und die Bestvariante wird ermittelt. Dazu erforderlich ist eine Gewichtung der Projektierungsziele, welche bei jedem Bauwerk neu, in Abhängigkeit