

Giovanni De Cesare, Michael Pfister, Milad Daneshvari und Martin Bieri

Herausforderungen des heutigen wasserbaulichen Versuchswesens mit drei Beispielen

Die meisten technischen Universitäten oder Hochschulen, welche Bauingenieure ausbilden, verfügen seit annähernd 100 Jahren über wasserbauliche Laboratorien. Darin werden mittels physikalischer Modellierung Elemente von Talsperren, Wasserkraftwerken oder Hochwasserschutz-Maßnahmen überprüft und optimiert. Mehrmals wurde dieser klassischen Methode bereits das Ende vorausgesagt, trotzdem sind die Versuchsanstalten ausgebucht. Die Autoren umreißen den Wandel der Branche und geben drei Beispiele dazu.

1 Einleitung

1.1 Rückblick

Im 19. Jahrhundert wurde die Hydraulik typischerweise in zwei parallelen Ansätzen angegangen. Einerseits die klassische theoretische Strömungslehre (Fluidmechanik) mit der Anwendung von analytischen Ansätzen zum Studium von vielfältigen Abflüssen. Durch die Schwierigkeiten und Komplexität der zu untersuchenden Phänomene und mangels rationaler Grundlagen erhielt das hydraulische Versuchswesen als zweiter Ansatz einen wichtigen Stellenwert. Die Navier-Stokes-Gleichungen lösen sich für jede beliebige Beanspruchung, selbst mit Luft und Sedimenten, „wie von selbst“. Ungeachtet einiger Glanzleistungen in der damaligen Fluidmechanik (de Saint-Venant, Cauchy, Darcy, Navier, Poisson, Reynolds, Stokes, Weisbach und andere) und deren praktischen Anwendungen, schien der Horizont für weitere Meilensteine jedoch begrenzt. Es machte den Anschein, als ob Mathematiker und Physiker Zusammenhänge und Theorien aufstellten, die sie nicht beobachten konnten, und Praktiker Beobachtungen machten, die sie nicht erklären konnten.

Die ersten hydraulischen Versuchsanstalten, teilweise rudimentär ausgerüstet, wurden vor diesem Hintergrund gegründet: Dresden 1891, Braunschweig 1898 und Cornell 1899. Die Blütezeit des wasserbaulichen Versuchswesens begann allerdings erst anfangs des 20. Jahrhunderts, mit La-

bor-Gründungen in Karlsruhe und Berlin 1903, St. Petersburg 1907, Toulouse und Darmstadt 1908, Padova und Worcester/USA 1910, Graz 1912, Wien 1913, München 1914, Grenoble 1921, Iowa 1922, Delft 1927, Lausanne 1928 und Zürich 1929 [1], [2], [3], [4]. Ab dann wurden weltweit die meisten großen Wasserkraftanlagen ganz oder teilweise im physikalischen Modell optimiert oder dadurch gar erst ermöglicht.

Die Leistungen der Wasserbaulabors waren bis Mitte der 1990er Jahre stark nachgefragt. Durch den rasanten Fortschritt der Numerik im Bereich der Fluidmechanik und deren immer praxistauglichere Anwendung ist dem wasserbaulichen Versuchswesen eine leistungsstarke Alternative entstanden. Einige Versuchsanstalten mussten in der Folge um ihre Existenzberechtigung kämpfen, andere wurden aufgehoben beziehungsweise deren Aktivitäten stark reduziert.

Innovative Institutionen, die teilweise ihr Tätigkeitsfeld auf die numerische Simulation ausgeweitet haben, ist die Arbeit dennoch nicht ausgegangen: Die Nachfrage besteht dank neuen Fragestellungen und Herausforderungen weiterhin ungebrochen. Die Kombination der beiden Modellierungsmethoden, welche deren jeweilige Stärke ausnutzt, ermöglicht dem Versuchingenieur einen noch nie dagewesenen, präzisen Einblick ins fließende Wasser. Parallel zur Schärfe des Wissens und der Einsicht in Vorgänge, erlauben die

beiden Ansätze auch einen ökonomischen Zugang je nach Fragestellung.

1.2 Neue Herausforderungen

Worin bestehen die neuen Herausforderungen und Fragestellungen des wasserbaulichen Versuchswesens?

Aufgrund ihrer teils langjährigen Erfahrung im genannten Bereich, hauptsächlich am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), schildern die Autoren die beobachteten Veränderungen aus ihrer subjektiven Sichtweise. Diese sind:

- Der Zeitdruck hat zugenommen. Von der Anfrage bis zum Abschluss der Untersuchungen sind oft nur wenige Monate eingeplant. Nicht selten ist ein Projekt zum Zeitpunkt der Offertanfrage bereits in Bau.
- Die geforderte Modellierung wird stetig komplexer. Oft sind ganze Systeme mit dynamischer Beaufschlagung zu betrachten. Stark transiente und nicht stationäre Abflussszenarien sind heute die Regel.
- Es besteht eine Tendenz zu immer größeren Vollmodellen. Nur teilweise wird auf die wesentlichen Phänomene fokussiert, dafür werden alle messbaren Parameter in einem einzigen Modell einbezogen (wie Luften- und -austrag, Geschiebetransport, Kolkbildung, Wasserspiegelverlauf, Fließgeschwindigkeiten, Wirbel usw.). Die führt zu teilweise suboptimalen Maßstäben.

- Die Nachfrage nach hybrider numerisch-physikalischer Modellierung nimmt zu. Damit kann der vorgängig erwähnte Punkt umgangen werden, indem im physikalischen Modell nicht nachvollziehbare Phänomene oder Perimeter mittels des numerischen Modells abgebildet werden.
- Insbesondere im Rahmen von Hochwasserschutzprojekten wird vom Versuchslabor aktive Öffentlichkeitsarbeit erbeten oder gar erfordert.
- Für die Vertragsgestaltung ist ein gesteigerter Aufwand für administrative und rechtliche Fragen, oftmals unter Einbezug von Juristen erforderlich.
- Garantien zum Projekterfolg werden gefordert, wie sie im wasserbaulichen Versuchswesen unmöglich sind. Das Labor gewährleistet nach den Regeln der Kunst präzise Messungen und Beobachtungen sowie Aussagen und Resultate zur Strömung im physikalischen Modell. Die nachfolgende fachgemäße Anwendung von Ähnlichkeitsgesetzen, gekoppelt mit Erfahrung, erlaubt einen Rückschluss zum Prototyp.
- Eine aussagekräftige Modellierung basiert auf einem ausgereiften Projekt. Anfragen zur Offertstellung ohne Pflichtenheft werden meist mit einem noch provisorischen Projektentwurf begründet.
- Der Umfang der Optimierungsarbeiten am eingereichten Projekt hat zugenommen. Das Versuchslabor bietet Unterstützung bei der Entscheidungsfindung durch den projektierenden Ingenieur oder den Betreiber an.
- Ingenieurleistungen werden an die Versuchsanstalt delegiert. Diese sollte jedoch als meistens öffentliche Einrichtung nicht in Konkurrenz zu den Planern treten.
- Die neuen Herausforderungen an die Wasserkraft, beispielsweise Nachhaltig-

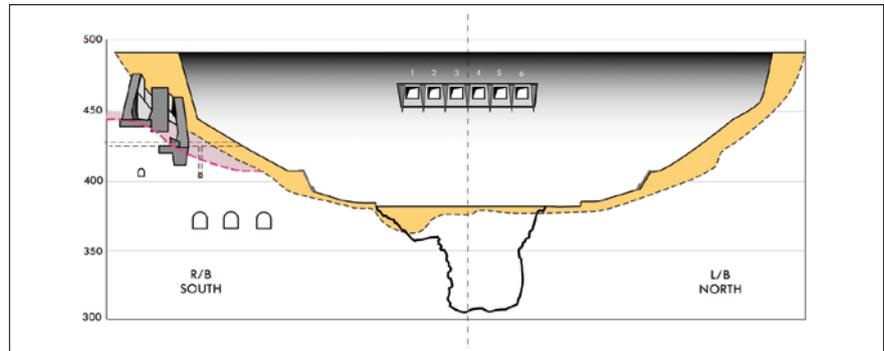


Bild 1: Längsschnitt der Kariba-Sperre mit der Hochwasserentlastung und dem unterstrom gelegenen Kolkloch (Aufnahme 2001; nach [5])

keit, Einbezug der Sedimentationsproblematik, Mehrzweckanlagen usw., spiegeln sich direkt in der nachgefragten Modellierung wider.

Die meisten der genannten Veränderungen basieren vermutlich auf dem gesteigerten Kosten- und Zeitdruck der Planer und Betreiber. Andere sind sicherlich auch aus veränderten Verantwortlichkeiten abgeleitet. Anhand von drei aktuellen Fallbeispielen des LCH werden nachfolgend einige attraktive Leistungen des wasserbaulichen Versuchswesens aufgezeigt.

2 Fallbeispiele

2.1 Außergewöhnlicher Kolk

Der Kolk unterstrom der Kariba-Staumauer am Sambesi im Grenzgebiet zwischen Simbabwe und Sambia im südlichen Afrika ist wegen seiner Tiefe außerordentlich. Durch den langandauernden Betrieb der Hochwasserentlastung mit frei fallenden Wurfstrahlen hat sich über vierzig Jahre ein tiefes und steiles Kolkloch gebildet. Der tiefste Punkt befindet ungefähr 70 m unter dem ursprünglichen Flussbett und ungefähr 80 m unterhalb des Unterwasserspiegels (**Bild 1**) [5]. Dies ist bemerkens-

wert, da der Talgrund in der Schlucht vornehmlich aus resistentem Gneis besteht.

Die Talsperre wurde als doppelt gekrümmte Bogenstaumauer zwischen 1956 und 1959 erbaut. Die Mauer ist 128 m hoch und hat eine Kronenlänge von 617 m. Das durch die Talsperre aufgestaute Reservoir ist mit 280 km Länge, 5 580 km² Oberfläche und einem Volumen von 180 km³ bemerkenswert. Die Hochwasserentlastung besteht aus sechs 8,80 m hohen und 9,15 m breiten Durchlässen in der Mauer, deren Abflusskapazität insgesamt 9 000 m³/s beträgt. Die sechs Wasserstrahlen treffen systembedingt nahe dem Mauerfuß und ohne maßgebliche Dissipation entlang der Trajektorien konzentriert ins Tosbecken.

Mit verschiedenen Modellversuchen wurde in der Vergangenheit versucht, diese Problematik anzugehen. Da die Kolkentwicklung im Labor in Lockermaterial untersucht wurde und somit der Felskolk nicht naturgetreu modelliert werden kann, waren diese Studien ohne Erfolg. Deshalb wurde ein hybrider numerisch-physikalischer Modellansatz angewandt.

Das Hauptziel der Modelluntersuchung war es, die Strömungsverhältnisse im bestehenden Kolkloch zu untersuchen und



Bild 2: Kariba-Talsperre am LCH: a) Übersicht physikalisches Modell mit derzeitigem Kolkloch; b) Fokus auf die optimierte Kolkgeometrie

eine weitere Eintiefung zu lenken oder zu unterbinden. Dazu wurde die Form des Kolklochs angepasst, um eine Energieumwandlung im Wasser zu erzwingen, ohne dass danach die Kolkflanken weiter in Mitleidenschaft gezogen werden (**Bild 2**). Das physikalische Modell im Maßstab 1:65 lieferte dabei die effektiven, 3-D-Strömungsverhältnisse und die dynamischen Drücke an der Kolkoberfläche, während dem numerischen Modell Ansätze zur Desintegration des Wurfstrahls mit dessen Luftaufnahme und die effektiven Gesteinseigenschaften inklusive Klüftung zu Grunde lagen. Zur Erfassung der Strömung im Kolkloch und deren makro-turbulenten Eigenschaften wurden im physikalischen Modell ADV-Messungen durchgeführt sowie 16 dynamische Druckaufnehmer mit einer Messfrequenz von 1 kHz installiert. Das numerische Comprehensive-Scour-Modell [6], [7] ermöglichte die Simulation der zeitabhängigen Kolkgeschichte, kalibriert mit der Entwicklung des Kolklochs über die letzten vierzig Jahre und kombiniert mit der Betriebscharakteristik der Schützen. Das numerische Modell wurde im Rahmen eines EPFL-Forschungsprojekts entwickelt und anschließend mehrfach erfolgreich angewandt (AquaVision Engineering).

Das Ziel einer langfristigen und nachhaltigen Stabilisierung des Kolkloches konnte mittels des Zusammenspiels von physikalischer und numerischer Modellierung erreicht werden [8]. Die Studie wurde durch Coyne & Bellier als beratende Ingenieure begleitet.

2.2 Verdoppelung der Pumpspeicherkapazität

Das Pumpspeicherkwerk Veytaux nahe Montreux in der Schweiz wird zurzeit auf die doppelte Kapazität ausgebaut. Die Anlage gehört den Forces Motrices Hongrin-

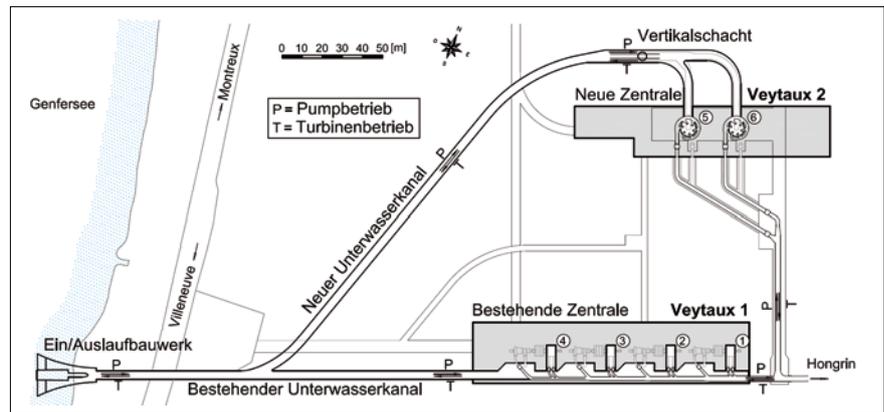


Bild 3: Bestehende und neue Zentralen Veytaux 1 und 2 mit dem gemeinsamen Unterwasserkanal und Ein- und Auslaufbauwerk in den Genfersee.

Léman SA (FMHL). Im Rahmen des Projekts „FMHL+“ (planende Ingenieure Stucky AG) wird ein Ausbau der Turbinenleistung von heute 240 MW (4 mal 60 MW) auf neu 480 MW (zusätzlich 2 mal 120 MW) realisiert. Eine doppelt gekrümmte Bogenstaumauer stellt bei Stauziel 1 255 m ü. M. ein Stauvolumen von $52 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bereit. Als Unterbecken fungiert der Genfersee mit einer Staukote auf rund 372 m ü. M. Der aktuelle Ausbauabfluss von $24 \text{ m}^3/\text{s}$ wird auf neu $48 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht. Das Erweiterungsprojekt übernimmt Staumauer, Wasserstollen, Druckschacht und das Ein- und Auslaufbauwerk im Genfersee unverändert. Zusätzlich werden ein Wasserschloss, eine Zentrale mit zwei vertikalen Gruppen und eine Druckschachtverbindung erstellt. Die neue Anlage kann im hydraulischen Kurzschluss betrieben werden.

Das physikalische Modell bildete die bestehende Zentrale Veytaux 1, die neu zu erstellende Zentrale Veytaux 2 sowie den kombinierten Unterwasserkanal in den Genfersee ab (**Bild 3**). Die Hauptziele der physikalischen Modellierung im Maßstab 1:30 waren:

- Bestimmung der Energieverluste für Pump- und Turbinenbetrieb im Unterwasserkanal mit Fokus auf die Vereinigung und das Ein- und Auslaufbauwerk.
- Analyse und Optimierung des gemeinsamen Unterwasserkanals bzw. des Ein- und Auslaufbauwerks im Genfersee zur Gewährleistung des Betriebs bei maximalen Abflüssen und tiefem (Pumpbetrieb) oder hohem Seestand (Turbinenbetrieb).
- Bei Regelbetrieb können die einzelnen Gruppen in sehr kurzer Zeit angefahren bzw. außer Betrieb genommen werden. Die dadurch resultierenden Transienten mit Wellenausbreitung im Unterwasserkanalsystem weisen ein Störungspotenzial des Betriebs auf, namentlich bezüglich Einstau der Turbinen oder Lufteinzug bei den Pumpen. Ungünstige Betriebszustände wurden im Modell ermittelt und durch den Kunden sowie seinen Planer im Betriebsreglement berücksichtigt.

Die Komplexität und Dynamik des Systems stellte außerordentliche Anforderungen an die physikalische Modellierung (**Bild 4**) [9]. Um sämtliche Betriebszustän-



Bild 4: Physikalisches Modell mit a) Zentrale Veytaux 1 und b) Ein- und Auslaufbauwerk in den Genfersee

de abzudecken und insbesondere auch deren dynamische Übergänge und Not-Abschaltungen zu berücksichtigen musste das Modell mit 5 Pumpen, 14 Ultraschall-Pegelsonden, 11 Druckmesssonden, 6 geregelten Schiebern und sechs An-/Aus-Schiebern ausgerüstet werden. Ungefähr ein Kilometer Kabel waren notwendig, um die Regel- und Messeinrichtungen mit dem Steuercomputer zu verbinden. Den effektiven Versuchen ist eine lange Serie von Software- und Kalibrations-tests vorausgegangen.

2.3 Sedimentumleitstollen mit Rückspülung

Das Chespi-Palma-Real-Projekt ist Teil der geplanten Guayllabamba-Kaskade im Nordosten von Ecuador. Eine 63 m hohe, doppelt gekrümmte Bogenmauer mit Stauziel auf 1 450 m ü. M. stellt ein Stauvolumen von $4,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bereit, welches von einem Einzugsgebiet von 4 454 km² Fläche alimentiert wird. Das Reservoir wird als Tagesspeicher bewirtschaftet. Der geschätzte jährliche Sedimenteintrag von 820 000 m³ würde bereits in wenigen Jahren das gesamte Nutzvolumen auffüllen, wodurch die Anlage nur noch als Laufkraftwerk genutzt werden könnte. Selbst diese Nutzung würde durch das anfallende Geschiebe erschwert. Die Zentrale ist mit vier Pelton-Turbinen zu je 115 MW ausgerüstet und arbeitet mit einem Gefälle von 653 m.

Eine effiziente Geschiebepflege stellt entsprechend einen Schlüsselaspekt der Anlage dar und war in Zusammenarbeit mit dem Kunden sowie dem planenden Ingenieur (Lombardi AG Beratende Ingenieure) zu erarbeiten. Entspre-



Bild 5: Physikalisches Modell des Guayllabamba-Flusses mit Einlaufbauwerk zum Geschiebe- und Hochwasserumleitstollen

chend wurde ein Geschiebeumleitstollen vorgeschlagen und im Modell mit Maßstab 1:38 getestet (**Bild 5**) [10], welcher gleichzeitig als Hochwasserentlastung eingesetzt werden kann. Folgende Zielsetzungen waren zu erreichen:

- Untersuchung der Zufluss-Bedingungen und der Kapazität des Einlaufbauwerks sowie des Stollens.
- Betrieb des Stollens als Geschiebe- und Schwebstoffabzug ohne maßgebliche Betriebsbeeinträchtigung der Reservoir-Bewirtschaftung und des Turbinenbetriebs, Aufteilung des Geschiebeeintrags in den Stollen und ins Reservoir.
- Möglichkeit einer Rückspülung des Einlaufbereiches mit Zufluss aus dem

Reservoir (reverse flushing), mit einer Optimierung der Schwelle bei der Stauwurzel.

Das Spülkonzept des Umleitstollens ist in **Bild 6** erläutert. Eine feste Schwelle im Bereich der Stauwurzel des Reservoirs erzeugt einen Absetzraum im Zufluss, welcher vom Geschiebeumleitstollen frei gehalten wird. Ohne Geschiebetransport im Fluss wird der Speicher und das Kraftwerk im Normalstau betrieben (**Bild 6a**). Bei starkem Geschiebetrieb wird der Speicher allenfalls abgesenkt, damit das Geschiebe und das parallel auftretende Hochwasser durch den Umleitstollen abgeführt werden können, während das Kraftwerk unter Teillast gefahren wird (**Bild 6b**). Bei starkem Schwebstoff- und Geschiebeanfall muss der Speicher je nach abzuleitendem Zufluss auf relativ hohem Niveau belassen werden. Dies geschieht, um die Kapazität des Einlaufbauwerkes zu gewährleisten, damit Schwebstoffe und Geschiebe in den Stollen gelangen, während das Kraftwerk unter Teilbetrieb und mit nur sehr geringen Zufluss in den Speicher weiter Strom erzeugen kann (**Bild 6c**). Nach dem Abklingen des Hochwassers, und damit auch des Geschiebetriebes, wird das Reservoir falls notwendig zuerst wieder gefüllt. Der Umleitstollen bleibt vorerst in Betrieb, um Ablagerungen im Einlaufbereich dank der Strömung aus dem Speicher (Rückfluss) und dem Zufluss zu eliminieren. Damit ist es gelungen, einen zuverlässigen Betrieb des Kraftwerkes

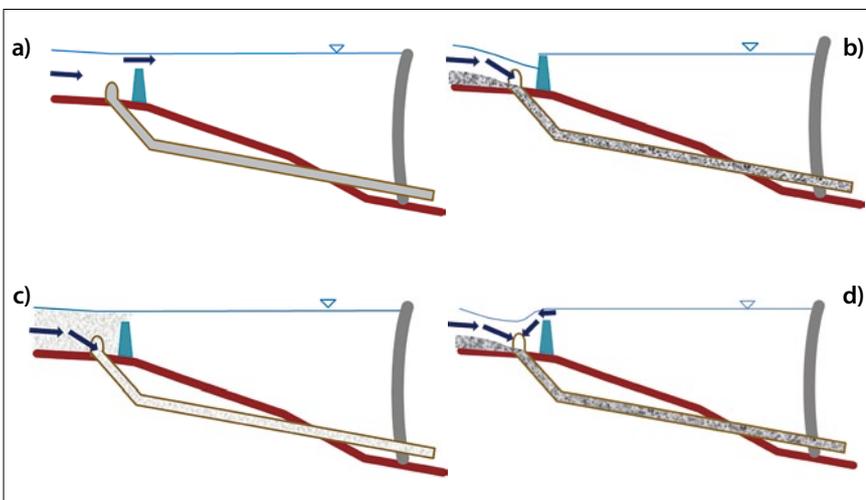


Bild 6: Illustrationen des Spülkonzepts

selbst bei Geschiebeanfall sicherzustellen und gleichzeitig die Speicherkapazität des Reservoirs zu erhalten.

Die physikalische Modellierung war insofern außergewöhnlich, da ein quasi-drei-direktionales, flexibles Modell zu erstellen war. Die Steuerung und Bewirtschaftung bezüglich Niveauregelung, Zu- und Abfluss sowie Geschiebe erfolgte von beiden Flussenden her. Diese Flexibilität war notwendig, da nicht a priori feststand, ob das Spülkonzept umsetzbar war und daher Änderungen im Modellregime voraussetzte. Das Modell hatte schließlich die Funktionstüchtigkeit des Umleitstolens bzw. des Spülkonzepts aufgezeigt.

3 Zusammenfassung

Das wasserbauliche Versuchswesen ist auch rund 100 Jahre nach der Gründung der großen Laboratorien gefragt. Die meisten der heute erstellten Talsperren, Wasserkraftwerke oder Hochwasserschutzprojekte durchlaufen im Rahmen ihrer Konkretisierung eine oder mehrere Phasen der physikalischen Modellierung. Seit einigen Jahrzehnten wird diese durch numerische Simulationen unterstützt, wodurch ein zweites, ergänzendes Instru-

ment zum Strömungsverständnis zur Verfügung steht.

Gleichzeitig ist das wasserbauliche Versuchswesen ebenso wie der gesamte Planungsprozess einem steten Wandel unterworfen. Nebst dem allgemeinen Zeit- und Kostendruck finden immer neue Instrumente und hydraulische Szenarien Eingang in die Modellierung und erhöhen zunehmend den Anspruch an die Versuchsanstalten. Die hybride Modellierung ist zur Regel geworden und die Versuchsingenieure sind zunehmend auch Experten in Informatik und Regelungstechnik. Drei Fallbeispiele umreißen diesen Wandel kurz, nämlich

- 1) die hybride Modellierung zur Nutzung der kombinierten individuellen Stärken der Methoden,
 - 2) die Komplexität der Modellierung dynamischer Prozesse mit dem entsprechenden technischen Aufwand und
 - 3) das Validieren von innovativen Konzepten mit flexibler Modellauslegung.
- Neben der Bedeutung der wasserbaulichen Laboratorien für die Planungsindustrie bzw. für den sicheren und effizienten Betrieb von konkreten Wasserbauten gilt es auch deren Wichtigkeit für die Grundlagenforschung herauszustreichen. Gemäß dem Eindruck der Autoren basieren

die meisten wissenschaftlichen Publikationen in anerkannten Fachzeitschriften nach wie vor auf Daten, welche im physikalischen Modell erhoben wurden.

Hinweis

Dieser Beitrag entstand in Kooperation mit der Arbeitsgemeinschaft Alpine Wasserkraft (AGAW), deren Organ die Fachzeitschrift WasserWirtschaft ist, im Nachgang zum AGAW-Symposium 2011 in Trier.

Autoren

Dr. Giovanni De Cesare
Dr. Michael Pfister
Milad Daneshvari
Martin Bieri

École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (EPFL-LCH)

Station 18

1015 Lausanne, Schweiz
giovanni.decesare@epfl.ch
michael.pfister@epfl.ch
milad.daneshvari@epfl.ch
martin.bieri@epfl.ch

Literaturverzeichnis

- [1] Rouse, H.; Ince, S. History of Hydraulics. Iowa City: Institute of Hydraulic Research, 1957.
- [2] De Thierry, G.; Matschoss, C. (Hrsg.). Die Wasserbaulaboratorien Europas. Entwicklung, Aufgaben, Ziele. Berlin: VDI-Verlag, 1926.
- [3] Vischer, D.: 50 Jahre Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich. In: Wasser, Energie, Luft 72 (1982), Nr. 2, S. 81-84.
- [4] Boillat, J.-L.: 75 Jahre Wasserbau und Hydraulik an der EPFL: 1928-2003. In: Wasser, Energie, Luft 95 (2003), Nr. 11/12, S. 379-382.
- [5] Mhlanga; Goguel, B.: Inspection in the dry of the Kariba arch dam toe. In: Hydropower & Dams (2007), Nr. 6, S. 79-82.
- [6] Bollaert, E. F. R.: A comprehensive model to evaluate scour formation in plunge pools. In: Hydropower & Dams (2004), Nr. 1, S. 94-101.
- [7] Bollaert, E. F. R.; Schleiss, A. J.: Physically based model for evaluation of rock scour due to high-velocity jet impact. In: J. of Hydr. Engng. 131 (2005), Nr. 3, S. 153-165.
- [8] LCH (Hrsg.). Hydraulic modeling of the Kariba Dam plunge pool to determine the optimum pool profile with respect to the Kariba spillway history. LCH/AVE-Bericht 04/2012, EPFL Lausanne, 2012.
- [9] LCH (Hrsg.). Augmentation de la puissance de l'aménagement Hongrin-Léman – Etude sur modèle physique. LCH-Bericht 03/2012, EPFL Lausanne, 2012.
- [10] LCH (Hrsg.). Chespi-Palma Real, Ecuador – Physical hydraulic model tests for flood and sediment bypass. LCH-Bericht 09/2011, EPFL Lausanne, 2011.

Giovanni De Cesare, Michael Pfister, Milad Daneshvari and Martin Bieri

Challenges of Current Hydraulic Modeling with three Examples

Most technical universities offering courses in civil engineering operate for meanwhile 100 years hydraulic laboratories. They investigate and optimize hydraulic structures related to dams, power plants and flood protection measures using physical modelling. These laboratories are usually fully booked today although this classical engineering approach was often predicted to disappear. The authors describe their experience and the new challenges in physical modelling, illustrated with three examples.

Джованни Де Чезаре, Михаэль Пфистер, Милад Данешвари и Мартин Биери

Требования к современным экспериментальным исследованиям в области гидротехники (3 примера)

Большинство технических университетов или институтов, в которых обучаются инженеры-строители, уже на протяжении примерно в течение 100 лет имеют собственные гидротехнические лаборатории. В них посредством физического моделирования проверяются и совершенствуются элементы плотин, гидроэлектростанций или мероприятия по противопаводковой защите. Уже неоднократно классическому методу предвещался конец, тем не менее все лаборатории полностью загружены работой. Авторы обрисовывают перемену в отрасли и иллюстрируют это на основе 3 примеров.