



# Differentiales Schachtwasserschloss für das Pumpspeicherkraftwerk Gouvães

*(Differential Shaft Surge Tank for the Pumped Storage Hydropower plant Gouvães)*

**Wolfgang Richter, Franz Georg Piki, Gerald Zenz, Christophe Nicolet,  
Christian Landry, Juan Carlos Vera, Luis de La Torre**

## Kurzfassung

Das Pumpspeicherkraftwerk (PSKW) Gouvães mit 880 MW ist derzeit in Portugal in Bau. Es ist ein Regelkraftwerk mit vier reversiblen Pumpturbinen. Im Oberbecken können 19 GWh elektrischer Strom gespeichert werden. Das PSKW ist Teil des Wasserkraftprojektes Alto Tâmega von Iberdrola, am Fluss Tâmega. Das oberwasserseitige Wasserschloss wird als differentielles Schachtwasserschloss ausgeführt. Ein Hauptschacht mit 21 m Innendurchmesser ist gedrosselt an den Druckstollen angeschlossen. Ebenfalls an den Druckstollen ist ein ungedrosselter Differentialschacht mit 8 m Durchmesser angeschlossen, welcher in den Hauptschacht integriert ist und als Schützenschacht dient. Dieser weist einen Überfall in den Hauptschacht auf, der bei Notschlusslastfällen einen Wasserfall erzeugt. Ein zusätzlicher Luftschacht ermöglicht für extreme Lastfälle zu jeder Zeit einen Notschluss des Schützes. Das Wasserschloss wurde in einem numerischen und einem instationären physikalischen Modell im Maßstab 1:25 an der TU Graz untersucht. Es wurden dazu eine asymmetrische Düsendrossel und die finale hydraulische Konzeption entwickelt und überprüft. Die hydraulische Wirkung des Wasserschlosses wurde bezüglich der Druckstoßkompensierung und der Minimierung der Volumenforderung für die Massenschwingung durch ungünstige Anregung des hydraulischen Systems für Resonanzschaltfälle optimiert und bestätigt. Aufgrund der direkten Integrierung eines Überlaufs mit Wasserfall wird keine Luft in den Druckstollen eingeblasen. Die transienten Druckstoßphänomene wurden von Power Vision Engineering (PVE) untersucht und bilden insbesondere für ungünstige Lastabwürfe aus dem Turbinen- und Pumpbetrieb wichtige Randbedingungen für ein robustes Wasserschlossdesign. Es wird im vorliegenden Artikel auf die Auslegungslastfälle für das Wasserschloss und das Pumpspeicherkraftwerk eingegangen. Im Vortrag wird zudem über die Erfahrungen aus dem aktuellen Bau eingegangen.

## Abstract (English)

The upstream surge tank of the pumped-storage hydropower power plant (PSH) Gouvães with 880 MW is currently under construction in Portugal. It is a grid regulation power plant with four reversible Francis pump turbines utilizing 19 GWh of electricity storage capacity. The PSH is part of the hydroelectric project Alto Tâmega of Iberdrola on the Tâmega River. The upstream surge tank is a throttled shaft surge tank with integrated gate shaft which is an unthrottled riser connected to the pressure tunnel. It has an overflow into the main shaft. An additional aeration shaft enables an emergency closure of the gate at any time and for extreme load cases. The surge tank was examined in a transient hydraulic model on a scale of 1:25 at Graz University of Technology. For this purpose, an asymmetric orifice throttle and the final hydraulic design were developed and tested. The hydraulic effect of the surge tank was optimized and confirmed with regard to the water hammer compensation and the minimization of the volume requirement for the mass oscillation by unfavorable excitation of the hydraulic system for resonance load cases. Due to the direct integration of an overflow with a waterfall, no air is entrained into the pressure tunnel. The transient pressure surge phenomena were investigated by Power Vision Engineering (PVE) and are important boundary conditions for the robust surge tank design, especially for unfavorable extreme load rejections in generating and pump mode operations.

## 1 Kraftwerksbeschreibung

Das differentielle Schachtwasserschloss ist im oberwasserseitigen Druckstollen mit der Länge von 4.7 km und einem inneren Durchmesser von 7.3 m positioniert (Abb. 1). Der Stollen ist mit einer Ortbetonauskleidung ausgestattet. Die Kraftkaverne ist mit einem 860 m langen Unterwasser (UW)-Triebwasserweg mit dem UW-Speicher Daivões verbunden. Das UW-Wasserschloss ist ein Kammerwasserschloss, welches nah an den Maschinensätzen errichtet wurde, um möglichst geringe Trägheitswerte aufzuweisen (Richter, et al., 2019).

Daten der Kraftwerksanlage Gouvães und der fixed-speed Pumpturbinen:

- Q Turbinenbetrieb: 160 m<sup>3</sup>/s
- P Turbinenbetrieb: 880 MW
- Q Pumpbetrieb: 132 m<sup>3</sup>/s
- P Pumpenbetrieb: 880 MW
- Rohfallhöhe: 666 m, STZ OW – ASZ UW  
645 m, ASZ OW – STZ UW

Ein Schütz als oberwasserseitiges Absperrorgan ist in das Wasserschloss integriert. Das Wasserschloss dämpft die Massenschwingung des oberwasserseitigen Druckstollens, es minimiert die Druckstoßbelastungen des Systems und erlaubt die Regelfähigkeit der Maschinen. Extreme Belastungen können durch Pumpenabwürfe und Turbinenabwürfe aus Vollast zu ungünstigen Zeitpunkten auftreten.

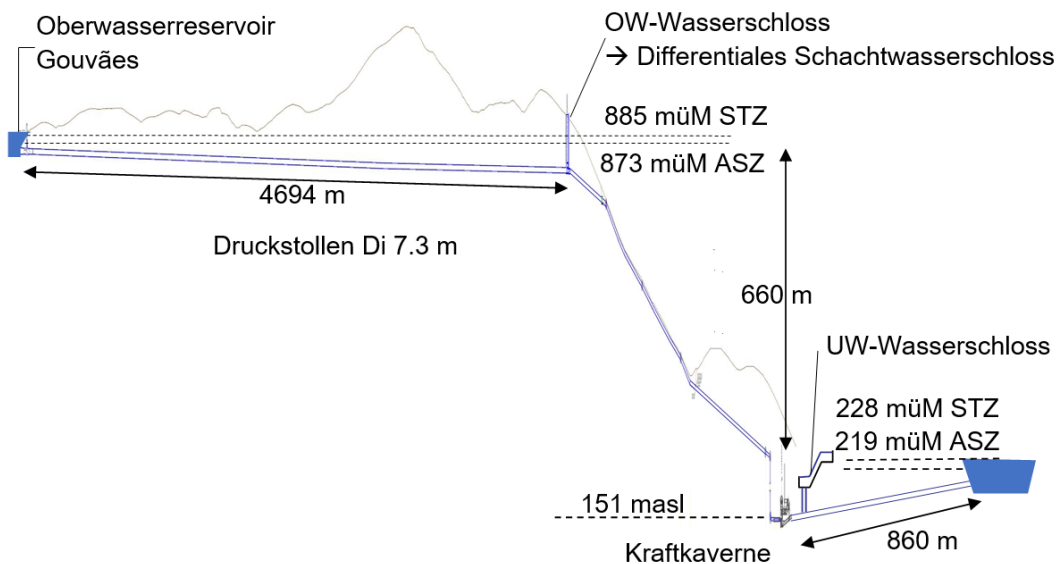


Abb. 1: Längenschnitt Oberwassersystem PSKW Gouvães

Das Wasserschloss besteht aus einem Hauptschacht, einem Differentialschacht und einem Belüftungsschacht. Die Schächte stehen in direkter Verbindung mit der Atmosphäre. Der Differentialschacht mit dem Schütz ist ungedrosselt an den Druckstollen angeschlossen, während der Hauptschacht mittels einer differentiellen Drossel mit dem Druckstollen verbunden ist. Die Düsendrossel weist ein asymmetrisches Drosselverhältnis mit einem höheren Aufschwingwiderstand im Vergleich zum Abschwingverlust auf.

Der Differentialschacht repräsentiert die Druckverhältnisse am Fußpunkt des Wasserschlusses entsprechend dem Wasserpegel, während der Hauptschacht gemäß den instationären Drosselverlusthöhen einen tieferen bzw. höheren Pegel einnimmt. Die differentielle Wirkung des Wasserschlusses ermöglicht eine effiziente Reaktion des Wasserschlusses, was geringere Wasservolumina und daher Ausbruchsmengen bedarf. Für Belastungssituationen wie Lastabwürfe und Pumpenabwürfe reagiert der ungedrosselte Differentialschacht entsprechend rasch mit Pegeländerungen. Der Wehrüberfall des Differentialschachts wirkt als limitierende Komponente, welcher beim Überlauf einen spektakuläreren Wasserfall generiert. Dieser wiederum trägt unweigerlich Luftblasen in den

Hauptschacht ein. Aufgrund der Gleichzeitigkeit des Lufteintrags über den Wasserfall, welcher mit dem Aufschwingvorgang einhergeht, strömt Wasser durch die Drossel in den Hauptschacht, was wiederum einen Luftblaseneintrag in den Druckstollen verhindert. Für den darauffolgenden Abschwingvorgang bleibt den Luftblasen ausreichend Zeit aufzusteigen.

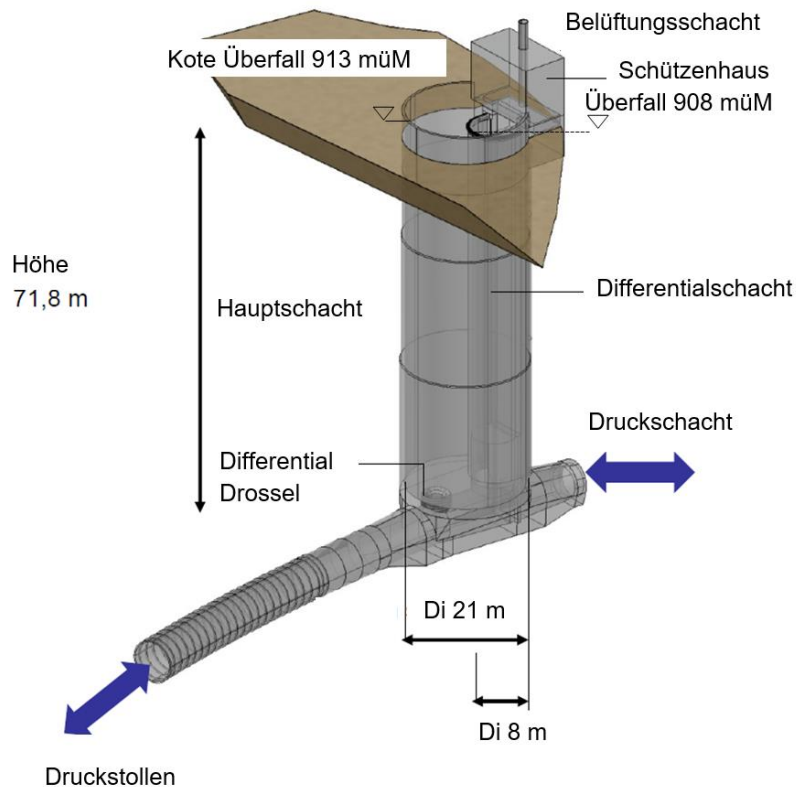


Abb. 2: Geometrie des differentiellen OW-Wasserschlosses

## 2 Lastfälle

Das Pumpspeicherkraftwerk ist hydraulisch dimensioniert, um in 90 Sekunden auf Vollast Turbinenbetrieb anzufahren und auch wieder auf Nullast im zyklischen Betrieb reduzieren zu können. Das Wasserschloss darf für keinen Betriebsfall überlaufen, bzw. auslaufen. Auch dürfen keine kritischen Unterdrücke im Triebwassersystem, insbesondere im Bereich des Übergangs in den Druckschacht auftreten. Eine Vielzahl von Lastfällen hinsichtlich des Druckstoßes und der Massenschwingung wurden von PVE sowie vom Maschinenlieferanten in den Vorstudien und begleitenden Berechnungen durchgeführt. Die Schaltvorgänge können zum ungünstigsten Zeitpunkt auftreten und dabei das Wasser im Druckstollen anregen. Der Turbinenresonanzfall beschreibt ein Anfahren auf Vollast, ein Umschalten auf Nullast zum ungünstigsten Zeitpunkt, darauffolgend ein Wiederbelasten auf Vollast wiederum

zum ungünstigsten Zeitpunkt. Für die Auslegung des Oberwasser-Wasserschlosses wurden drei signifikante Lastfälle definiert:

LF A) Turbinenresonanzfall für maximalen Pegel im Wasserschloss

LF B) Turbinenresonanzfall für minimalen Pegel im Wasserschloss

LF C) Pumpenlastfall für minimalen Pegel im Wasserschloss

LF A) beschreibt einen zyklischen Turbinenbetrieb bei Stauziel des Oberbeckens mit Anfahren in 90 Sekunden, Lastreduktion auf Nulllast in 90 Sekunden, Wiederbelastung auf Volllast in 90 Sekunden und ungünstigem Lastabwurf aller Turbinen. Die Schaltpunkte werden so definiert, um ein möglichst ungünstiges Schwingverhalten mit hohen Amplituden zu erreichen.

LF B) Beschreibt denselben Turbinenresonanzlastfall wie bei LF A), allerdings bei Absenkziel im Oberwasserbecken. Nach der Wiederbelastung der Turbinen zum ungünstigen Zeitpunkt kommt es zu einem raschen Absinken des Pegels im Differentialschachts um effektiv Wasser für die Turbinen bereit zu stellen.

LF C) Beschreibt einen Volllast-Pumpenabwurf zum ungünstigsten Zeitpunkt, nachdem diese hochgefahren wurden. Dieser Lastfall beschreibt wie LF B) ein rasches Absinken des Pegels im Differentialschacht. In diesem Fall wird dies durch die Umkehrung der Wassersäule im Druckschacht hervorgerufen, da die Strömungsrichtung der Pumpen im Fall eines Pumpenabwurfes innerhalb weniger Sekunden umdreht, bevor der Leitapparat vollständig schließt. Dieser Lastfall ist auch für die Situation des minimalen Drucks im Wasserschlossbereich wichtig.

### **3 Modellversuch**

Das Wasserschloss wurde als transientes hydraulisches Modell im Maßstab 1:25 im Wasserbaulabor der TU Graz errichtet und nach den Froude'schen Modellgesetzen betrieben. Abb. 3 zeigt das Oberwasserwasserschloss mit zwei markierten Startpegeln für das Absenk- und das Stauziel. Das Modellwasserschloss ist aus dem Triebwasserweg herausgeschnitten, wobei die instationäre Strömungen des Systems als Randbedingungen angesetzt wurden. Die instationären Durchflüsse wurden mittels 1D-numerischer Simulation für die Bemessungslastfälle für den Prototypen ermittelt und mittels Froude'scher Ähnlichkeitsgesetze für die Modellanlage umgerechnet.

Der Modellversuch wird instationär mittels Druckluftventile durchgeführt, diese werden mittels PID Regler gesteuert. Der PID Regler vergleicht stets die Istwerte vom Momentandurchfluss des Modellversuchs mit den Sollwerten aus der 1D-numerischen Simulation und steuert entsprechend der kalibrierten Parameter die Ventile. Die transienten Durchflüsse des Stollens (Wasserschlossschwingung) und des Schachts (transiente Turbinen- und Pumpendurchflüsse) wurden überlagert um den instationären Zufluss bzw. Abfluss aus dem Modell auf eine transiente Ganglinie zu reduzieren. Der Vorteil liegt in der zeitlich exakten

Überlagerung der Durchflüsse, was insbesondere für die extremen Lastabwürfe bedeutend ist.

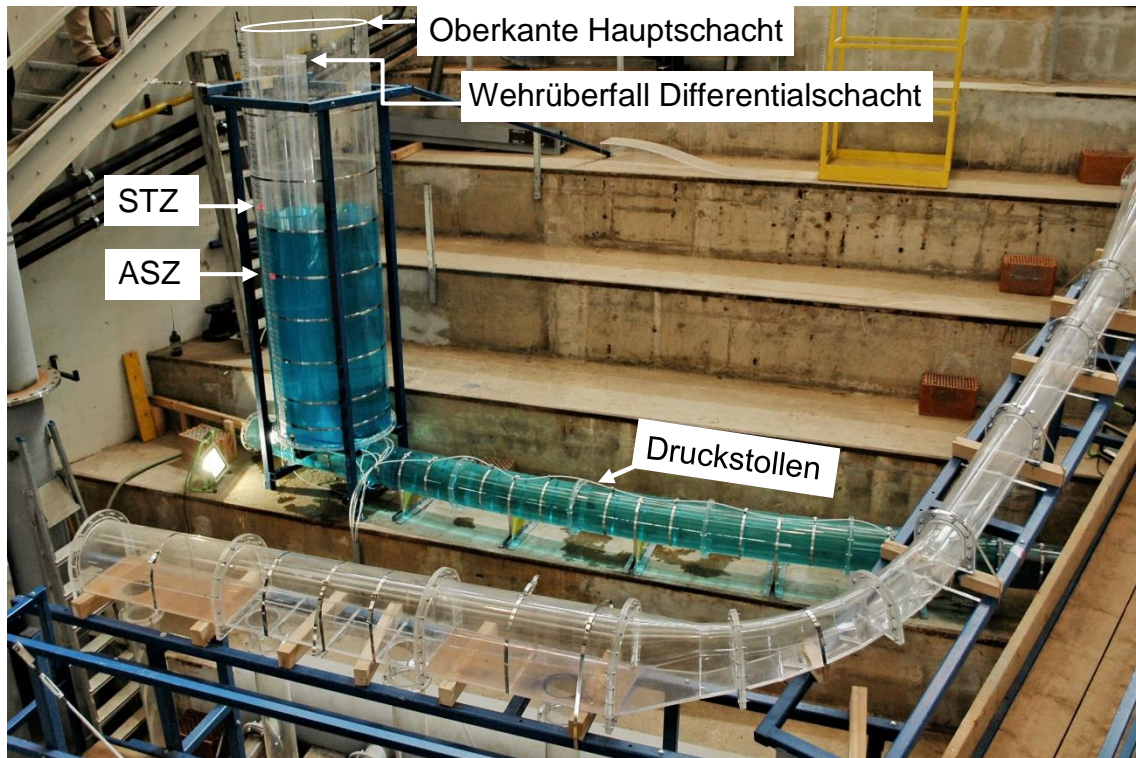


Abb. 3: Physikalischer Modellversuch 1:25, Oberwasser-Wasserschloss Gouvães, Wasserbau-labor TU Graz 2018. Im Vordergrund das Unterwasser-Wasserschloss des PSKW Gouvães

Abb. 4 zeigt die Positionierung der Drucksensoren in einem Schnitt des Druckstollens im Bereich des Wasserschlosses. Die Sensoren im Kreisprofil werden mittels Ringleitungen mit acht Bohrungen definiert. Es ergeben sich drei Pegel aus den drei Schächten, wobei im kleinsten Schacht, dem Belüftungsschacht, ein Trägheitseffekt feststellbar ist, welcher diesen höher aufschwingen lässt als die zwei größeren Schächte, was in der Konstruktion des Prototyps berücksichtigt wird. Der Differentialschacht beschreibt den Druckpegel im Wasserschlossfußpunkt, was dem Pegel im Hauptschacht plus der Wirkung der differentiellen Drossel entspricht.

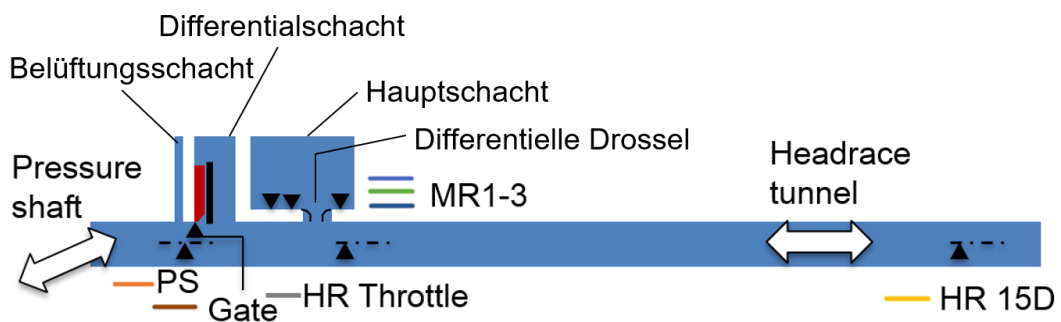


Abb. 4: Messstellen für Drucksensoren im Wasserschlossbereich im Druckstollen



Die Drossel wurde mittels 3D numerischer Simulationen ausgelegt, wobei eine 20%ige Abweichung hinsichtlich der ungünstigeren Seite des Verlustes angenommen wurden. Die Drossel wurde somit im physikalischen Vollmodell kombiniert untersucht.

Die Integration des Schützes (Gate) im Differentialschacht ermöglicht, dass lokale Drücke für transiente Zustände, wie den Aufschlag- oder Abschwungfall an der Unterkante und an der Oberkante des Schützes äquivalent sind, und dieses sicher in Position belässt.

## 4 Ergebnisse

Der Modellversuch bestätigt die Funktionsfähigkeit des Wasserschlosses für die Mehrfachschaltfälle bei Absenksziel und bei Stauziel für Turbinenbetrieb mit ungünstigen Lastabwürfen und für ungünstige Pumpenabwurfslastfälle. Abb. 5 zeigt beispielhaft den Vergleich der 1D-Simulation und dem Modellversuch für den transienten Pegelverlauf im Differentialschacht und im Hauptschacht für den Mehrfachschaltfall bei maximalem Pegel im Oberwasserbecken (LF A).

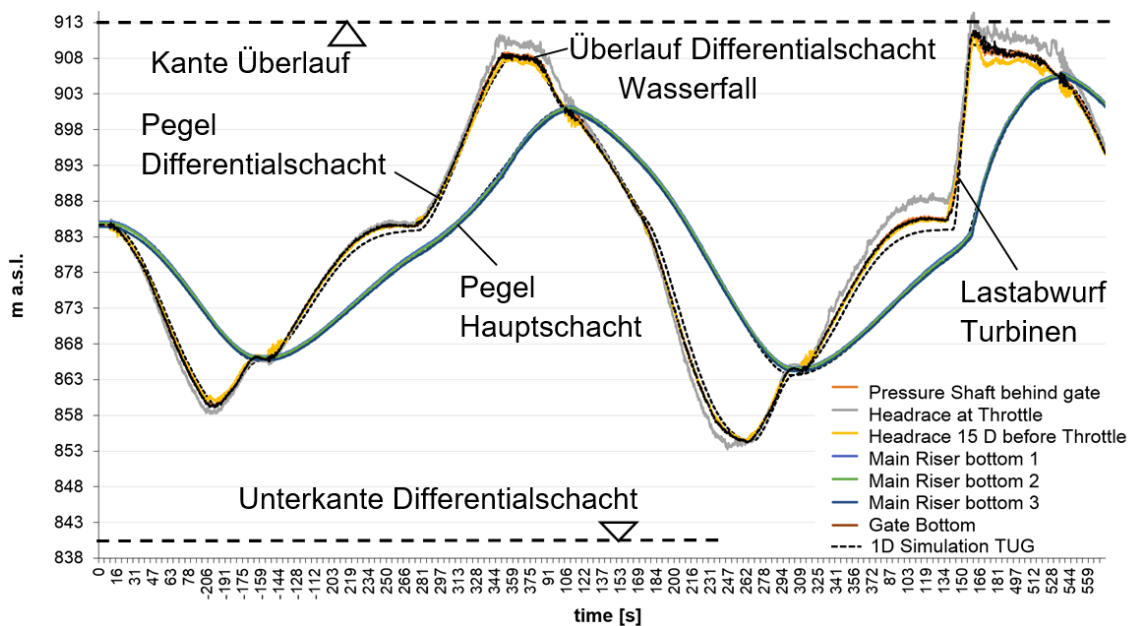


Abb. 5: Ergebnisse Maximales Aufschwingen im Hauptschacht, LF A

## 5 Zusammenfassung

Das differentiale Oberwasser-Wasserschloss des PSKW Gouvães wurde mittels 1D-numerischen, 3D-numerischen und physikalischem Modellversuch untersucht und hydraulisch optimiert. Das Wasserschloss wird durch den Einbau einer differentiellen Drossel mit höherem Aufschlagwiderstand im Vergleich zum Abschwungwiderstand vorgesehen. Im Differentialschacht ist ein notschlusstaugliches Schütz vorgesehen.

Das Wasserschloss wurde mittels transienter Modellversuche untersucht und die Funktionsfähigkeit für ungünstige Mehrfachschaltfälle im Turbinen- wie Pumpbetrieb bestätigt. Ebenfalls wird die effektive Dämpfung der differentiellen Drossel und deren numerischer Vordimensionierung bestätigt.

## Referenzen

Richter, W., Zenz, G., Nicolet, C., Landry, C., Vera Rodriguez, J., & De La Torre Abietar, L. (2019). Hydraulics of the Tail Race Surge Tank of Gouvães Pumped-Storage Hydropower. *Wasserwirtschaft Extra, S1*, 83-88.

## Adressen der Autoren

Wolfgang Richter (korrespondierender Autor)

Franz Georg Piki

Gerald Zenz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz

AT-8010 Graz, Stremayrgasse 10/2

Email: [wolfgang.richter@tugraz.at](mailto:wolfgang.richter@tugraz.at)

Christophe Nicolet

Christian Landry

Power Vision Engineering (PVE),

CH-1024 Ecublens, Switzerland

Juan Carlos Vera

Luis de La Torre

Iberdrola

E-28050, Madrid, Spain