

# Wasserschlossdesign für Stollenspeicher

*Wolfgang Richter, Helmut Knoblauch und Gerald Zenz*

## Zusammenfassung

Bei Ausleitungskraftwerken mit Triebwasserstollen weisen diese einen oftmals nicht zu vernachlässigenden Volumenanteil auf.

Die hydraulische Nutzung ist in den meisten Fällen rein auf den Transport von Wasser aus dem Stauraum zum Wasserschloss und dann über den Druckschacht zu den Turbinen beschränkt. Da der Stollen ein Drucksystem darstellt, erfolgt die Kommunikation des Druckausgleichs sehr effizient und schnell mittels Druckwellen.

Eine mögliche Nutzung des Triebwasserwegs als zusätzlicher Speicherraum für Kurzzeitspeicherung wie Tagesspeicher kann das nutzbare Volumen je nach Anlage signifikant erhöhen und gerade bei alpinen Einzugsgebieten die Betriebsweise einer Kraftwerksanlage flexibler gestalten. Auch kann ein Stollen als Schwall-Sunk Ausgleich herangezogen werden. Dadurch verändern sich allerdings das hydraulische Verhalten des Stollens und die Anforderungen an das Wasserschloss. Der Triebwasserweg wechselt somit den Abfluss zwischen Druckabfluss und Freispiegelabfluss. Diese Randbedingungen, sowie eine erforderliche Entlüftung beeinflussen die Auslegung des Wasserschlosses und die nötige Neigung des Triebwasserweges. Besonders bei großen Durchflüssen und mittleren Fallhöhen erfordert das Stabilitätskriterium für den Wasserschlossschacht einen sehr großen Querschnitt. Dieses Kriterium wird üblicherweise nach Thoma oder Svee berechnet (Thoma, 1910 und Jaeger C., 1949) bzw. (Svee, 1972 und Leknes, 2016). Der flache Stollen mit den geneigt angeordneten Wasserschloss-Kammern im Fallhöhenbereich des Kraftwerks weist sehr große Querschnitte auf welche somit das Stabilitätskriterium für die ausreichende Regelfähigkeit erfüllen.

Dieser Artikel hebt die Gesichtspunkte der Wasserschlossauslegung und der hydraulischen Parameter des Stollens hervor. Die Untersuchungen werden mittels 1D-numerischer Strömungssimulationen durchgeführt, welche durch physikalische Modellversuche und Messungen an Prototypen kalibriert sind.

Zusammenfassend wird ein prinzipieller hydraulisch-konstruktiver Vorschlag für die Ausführung von Stollenspeichersystemen dargelegt. Insbesondere die Auslegung eines Wasserschlosses zur idealen Kombination der Stabilitäts Herausforderungen mit einer ungestörten Betriebsweise wird erörtert. Für die hydraulische Auslegung für spezifische Kraftwerksanlagen sind transiente Simulationen erforderlich und es physikalische Modellversuche empfehlenswert.

## 1 Anwendungsbereich

Neben der Ausbauwassermenge und der Fallhöhe entscheidet die Speicherbarkeit von Wasser über eine effiziente Nutzbarkeit der erneuerbaren Energie aus Wasserkraftanlagen. Das Speicherbecken als großer Wasserspeicher kann in manchen Fällen sinnvoll durch die hydraulische Speichernutzung des Transportstollens ergänzt werden. Stollensysteme kommen insbesondere bei Speicherkraftwerken, Ausleitungskraftwerken oder Pumpspeicherkraftwerken vor.

Bei kleinen oder mittleren Ausleitungskraftwerken kann ein angepasster Betrieb auf die Stromnachfrage durch die Zwischenspeicherung im Stollen durchgeführt werden. Auch können

Schwall-Sunk Ausgleiche durch die dämpfende Wirkung zum Teil in den Stollen verlegt werden. Dies ermöglicht eine flexiblere Beteiligung für Netzregelleistungen. Bei Pumpspeicherkraftwerken, mit großer notwendiger Stolleninfrastruktur kann dieser zusätzlich zu einer Volumenoptimierung oder einem Schwall-Sunk-Ausgleich beitragen.

Eine ideale Neigung des Stollenspeichers kann anlagenspezifisch ermittelt werden. In etwa kann diese im Bereich von 0,1 % bis 0,2 % liegen. Seit 2014 ist in Tirol ein Wasserkraftwerk mit Stollenspeicher erfolgreich in Betrieb (Widmann, Lebesmühlbacher, Eder, & Knorpp, 2015).

### **1.1 Anforderungen an das Wasserschloss**

Ein Wasserschloss zur hydraulischen Trennung des Triebwasserweges ist bei Stollensystemen über eine gewisse Stollenlänge notwendig um die Regelbarkeit der Turbinen zu gewährleisten (Thoma, 1910). Damit das Wasserschloss durch selbständige Regelungsvorgänge keine Resonanzerscheinungen aufweist, muss dieses einen ausreichend großen horizontalen Querschnitt aufweisen, welcher bei Volumenänderungen durch Schaltvorgänge mit leistungsbeeinflussenden Druckänderungen korrespondiert. Da die Reibungsverluste im Druckschacht, welche sich ungünstig auf die Stabilität auswirken, in der Betrachtung von Thoma nicht berücksichtigt werden, muss dieser mit einem Sicherheitsfaktor multipliziert werden. Es werden Werte von 1,5 [-] bis 1,8 [-] vorgeschlagen (Jaeger, 1958). Genauere Berechnungen des erforderlichen Querschnittes können mittels Berechnungsformeln von Svee, 1972 bzw. Leknes, 2016 oder mit 1D-numerischen Stabilitätsberechnungen durchgeführt werden. Günstig auf die Stabilität wirken kurze Druckschächte und Arbeitsbereiche in denen die Gradienten des Wirkungsgrads der Turbinen ansteigt (vor dem Optimalwert des Wirkungsgrades). Eine Absteigende Wirkungsgradgradienten der Turbinen (nach dem Scheitelpunkt) wirkt ungünstig auf den erforderlichen Stabilitätsquerschnitt. Gerade für Ausleitungskraftwerke mit geringen oder mittleren Fallhöhen kann somit der üblicherweise verwendete Sicherheitsfaktor von 1,5 [-] für den Stabilitätsquerschnitt vermindert werden.

Das Wasserschloss vermindert zudem die Druckstoßbelastung auf den Druckstollen und ermöglicht schnelles Anfahren und Abschalten der Turbinen, wobei die Trägheit der Wassermassen im Stollen durch das Wasservolumen im Wasserschloss überbrückt wird. Das Wasser im Triebwasserweg wird durch die Druckdifferenz zwischen Wasserschloss und Reservoir beschleunigt.

Es muss sowohl das Anfahren ohne Abreißen der Wassersäule gewährleistet sein, als auch das Abschalten ohne Überlaufen des Wasserschlosses. Gerade für die Anforderung des Anfahrens ergibt sich für Stollenspeicher-Wasserschlosser eine veränderte Bedingung als für sonst übliche Hochdrucksysteme. Hier darf und soll der Stollen einen Freispiegelabfluss aufweisen.

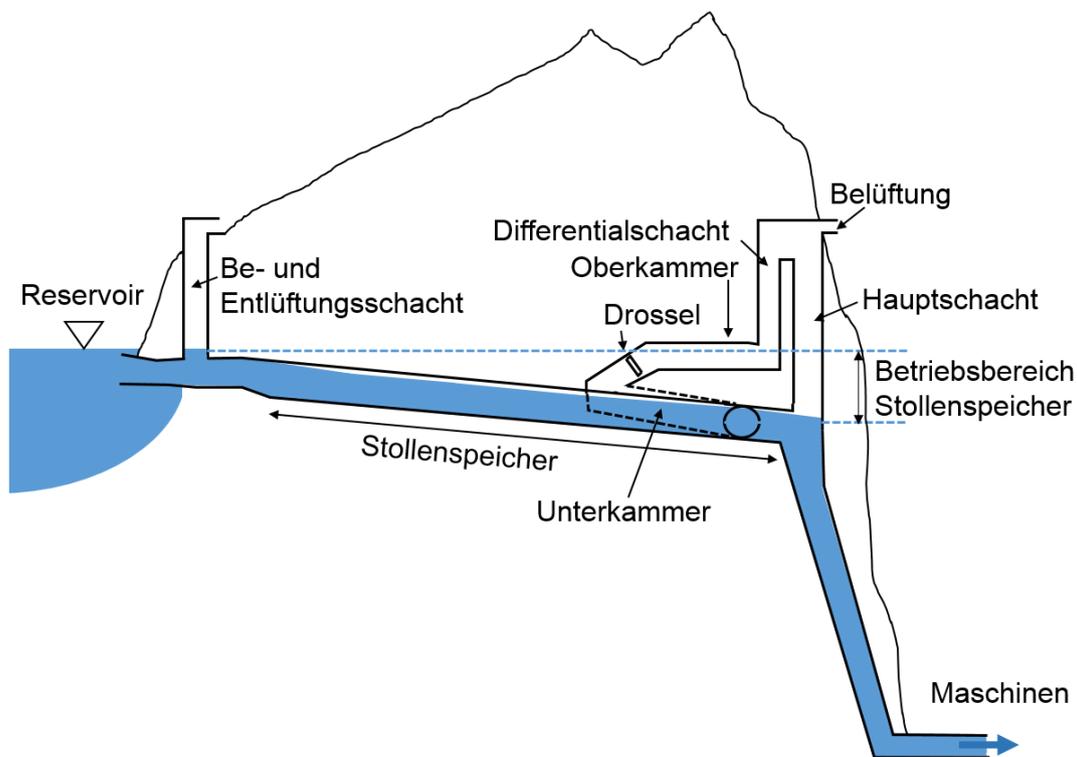
### **1.2 Stollenspeicher – Anfahren - Abschalten**

Um beim Anfahren der Maschinen einen Betrieb mit der Nutzung des Wasservolumens des Stollens zu gewährleisten müssen das Wasserschloss, bzw. die Kammern des Wasserschlosses, hydraulisch so konstruiert sein, dass unabhängig von der Anfahrzeit kein Abreißen der Wassersäule am Übergang Stollen-Druckschacht auftritt.

Abb. 1 zeigt einen schematischen Entwurf eines möglichen Stollenspeicher-Wasserschlosses. Durch eine tiefliegende Unterkammer kann der freie Wasserspiegel beim Abschwingen bis in

den Stollen ohne Abreißen absinken. Aufgrund der Stollenneigung und des Wasserschlosses können auch beliebige Zwischenschaltvorgänge ermöglicht werden.

Die differenziale Schachtanordnung ermöglicht im Fall des Abschaltens oder Notschlusses, dass die kinetische Energie im Stollen im Wasserschloss durch das Aufschwingen über den Überlauf gedämpft wird. Die Überlaufhöhe bildet somit das Druckmaximum für die Massenschwingung. Eine Oberkammer ist direkt nach der Unterkammer vorgesehen, hydraulisch verbunden aber mit einer Drossel ausgestattet. Die beiden Kammern sind als geneigte Stollen vorgesehen, wobei sich diese am erforderlichen Volumen aus der Massenschwingung und dem Stabilitätskriterium orientiert. Bautechnisch können somit beide Kammern vom selben Zugang aufgefahren werden. Die tiefe Oberkammer verringert deutlich die Dynamik des Zurückfließens von Wasser aus dem Wasserschloss zum Becken im Fall des Abschaltens. Die Drossel ist notwendig um beim Abschalten das Wasser aus der Unterkammer möglichst zurückzuhalten. Die Drosselung ist auf einen optimalen Durchmesser zu dimensionieren, wobei genügend Luft in der Oberkammer bleibt um für den Fall des Abschaltens Volumen vorzuhalten ohne, dass der Differenzialschacht sich füllt.



**Abb. 1** Schematischer Längenschnitt eines Ausleitungskraftwerkes mit Stollenspeicher und Stollenspeicher-Wasserschloss

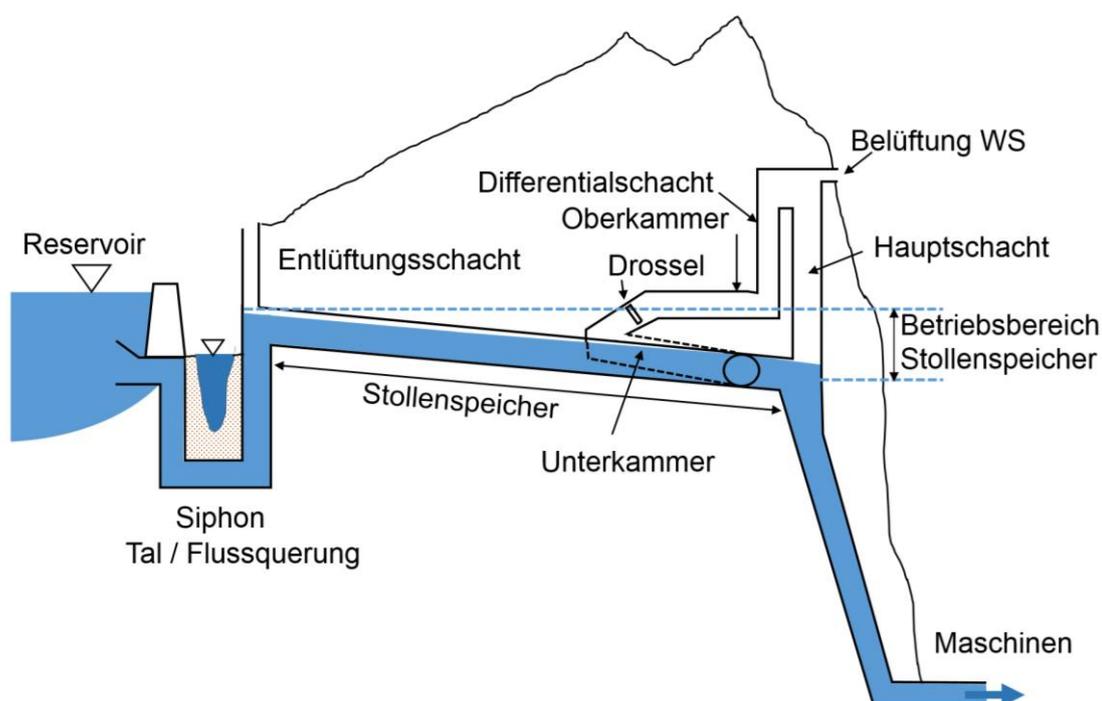
Da der Wasserschlossschacht ungedrosselt, und möglichst nahe am Druckschacht liegt, weist die Konstruktion eine ideale Druckstoßreflektion auf. Diese ergibt sich, da der Schacht unbeeinflusst von der Unterkammer sehr geringe Trägheitswerte aufweist und somit physikalisch rasch auf Druckstöße reagieren kann. Der Be- und Entlüftungsschacht nach dem Einlauf ermöglicht es entweichender Luft, oder Luft, welche sich an der Stollenfirste gesammelt hat, schadlos zu entweichen.

### 1.3 Erforderliche Stabilitätsquerschnitt im Wasserschloss

Bei hohen Ausbaudurchflüssen und niederen bis mittleren Fallhöhen weist das erforderliche Stabilitätskriterium sehr hohe erforderliche Querschnitte auf. Dies kann z.B. bei Ausleitungskraftwerken mit Stollen an größeren Flüssen auftreten. Ein sehr flach geneigter Stollenspeicher ermöglicht ein hoch liegendes Speicherstollen-Wasserschloss, wobei die Kammern im Betriebsbereich der Stauhöhen des Reservoirs liegen (mit Berücksichtigung der Verlusthöhe des Stollens). Dadurch können die Kammern für die Stabilitätsbetrachtung bei entsprechender hydraulischer Dimensionierung herangezogen werden.

### 1.4 Variante mit Düker

Abb. 2 zeigt eine Variante des Stollenspeichersystems mit einem Syphon wobei etwa Infrastrukturhindernisse oder Bäche umgangen werden können, damit der Speicherstollen möglichst hoch angeordnet werden kann.



**Abb. 2** Schematischer Längenschnitt eines Ausleitungskraftwerkes mit Stollenspeicher und Stollenspeicher-Wasserschloss bei Anordnung mit Siphon.

## 2 Untersuchungen

### 2.1 1D-Numerische Simulation

Die Hydraulik von Druckstollensystemen können zielführend mittels 1D-Numerischer Simulation untersucht werden. Dabei werden die transienten Vorgänge wie Massenschwingung und Druckstoßvorgänge berechnet und die Triebwasserwege sowie insbesondere das Wasserschloss für die Dynamiken ausgelegt. Um den Freispiegelabfluss im Stollen zweckmäßig modellieren zu können, sind 1D-numerische Werkzeuge zur Abbildung von Freispiegelabflüssen in Stollen erforderlich. Anhand einer Abschlussarbeit am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz wurde die Hydraulik eines Stollenspeichers eines mittelgroßen Wasserkraftwerks mit Stollenspeicher studiert. Es wurde das 1D-numerische Simulationswerkzeug Wanda 3.7 bzw. 4.2 für diese Fragestellungen evaluiert (Wechtitsch, 2014).

Im Wasserbaulabor der TU Graz konnten durch hybride Modellversuche (Numerik und physikalische Versuche) anhand großer Wasserschlossmodelle die 1D-numerischen Simulationen kalibriert werden (Richter, Schneider, Zenz, & Kolb, 2012; Richter W. , Schneider, Zenz, & Innerhofer, 2013). Bei Wasserschlässern, insbesondere in den Unterkammern, treten Strömungsübergänge von Druckströmungen auf Freispiegelabflüsse auf. Die Erfahrungen des hydraulischen Verhaltens der Unterkammer werden sowohl auf die Hydraulik des Stollens wie der Speicherstollen-Wasserschlossauslegung übertragen.

## 2.2 Fallstudie Stollenspeicher - Stabilitätsquerschnitt

Anhand einer Fallstudie werden 1D-Simulationen durchgeführt. Es werden Lastfälle für das Anfahren und das Abschalten sowie Stabilitätssimulationen durchgeführt. Für die Stollenrauheitswerte wird der Stricklerbeiwert angesetzt. Druckstollen weisen üblicherweise große Fließquerschnitte und hohe Reynoldszahlen auf. Bei Rückrechnungen von bestehenden Fließverlusten in Triebwasserwege werden Österreich für gewöhnlich Stricklerbeiwerte ermittelt. Für die transienten 1D-numerische Berechnungen werden diese Rauheitswerten in äquivalente Sandraugigkeitswerte umgerechnet. Die Kraftwerksgrößen werden folgendermaßen definiert:

- Bruttofallhöhe : 60 m
- Ausbauwassermenge: 140 m<sup>3</sup>/s
- Speicherstollenlänge: 15 000 m, D = 8,0 m
- Brutto - Stollenvolumen: 754 000 m<sup>3</sup>
- Ausbauleistung: 67 MW
- Druckschacht: L = 80 m, D = 6 m,  $K_{ST} = 110 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

### Stollen – ohne Betoninnenschale $k_{ST} = 55 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (maschineller Vortrieb – Spritzbeton)

- Erforderlicher Thoma-Querschnitt:  
Ohne Sicherheitsfaktor: 325 m<sup>2</sup>, mit Faktor 1,5 [-] (üblicherweise verwendet): 488 m<sup>2</sup>
- Erforderlicher Svee-Querschnitt = 433 m<sup>2</sup>

### Stollen – mit Betoninnenschale $k_{ST} = 85 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Falls der Speicherstollen mit denselben geometrischen Randbedingungen vorgesehen ist, allerdings mittels Betoninnenschale ausgekleidet ist kann man in etwa einen  $k_{ST}$ -Wert von 85 m<sup>1/3</sup>/s ansetzen. Dabei erhöht sich aufgrund der geringeren Reibungsverluste im Stollen die erforderlichen Stabilitätsquerschnitte für das Wasserschloss auf:

- Erforderlicher Thoma-Querschnitt:  
Ohne Sicherheitsfaktor: 777 m<sup>2</sup>, mit Faktor 1,5 [-] (üblicherweise verwendet): 1166 m<sup>2</sup>
- Erforderlicher Svee-Querschnitt = 833 m<sup>2</sup>

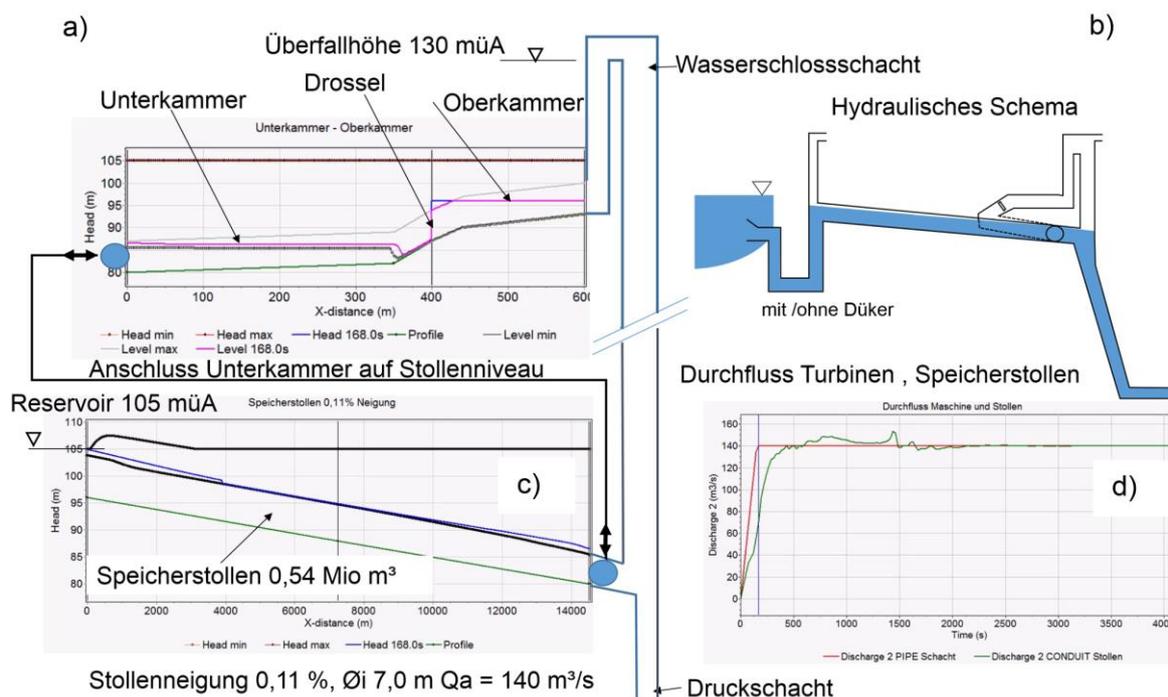
Der Vergleich der beiden Stollenkonfigurationen zeigt, dass die Stabilitätsbedingung nach Svee geringere erforderliche Wasserschlossquerschnitte ergibt als der übliche Ansatz des Thoma-Querschnitts mit Sicherheitsfaktor 1,5 [-]. Zugleich wird gerade für einen Speicherstollen, welcher mit Betoninnenschale ausgestattet ist deutlich, welche große Wasserschlossschachtquerschnitte erforderlich sind. Der Turbinenwirkungsgrad wird für das Fallbeispiel nicht berücksichtigt.

Durch die flache Ausführung weisen Speicherstollen, insbesondere bei Ausleitungskraftwerken, geringe Innendrucke auf. Bei Anordnung eines Speicherstollen-Wasserschloss mit Differen-

zialeffekt werden nur kurz höhere Drücke generiert. Daher kann für spezifische Stollensituationen und bei guten geologischen Voraussetzungen eine unausgekleidete Stollensvariante sowohl hydraulische (Stabilität und Volumen), konstruktive und wirtschaftliche Vorteile bieten.

### 2.3 Fallstudie Stollenspeicher mit Speicherstollen-Wasserschloss

Für eine generische Fallstudie wird die Funktionsweise des Speicherstollen-Wasserschlusses dargestellt. Für die Fallstudie wird ein Speicherstollen mit  $D = 7,0$  m und einer Länge von  $L = 14,5$  km und einem Ausbaudurchfluss von  $Q_A = 140$  m<sup>3</sup>/s. In den Abbildungen 3 bis 5 werden die hydraulischen Zustände des Anfahrens auf  $Q_A$ , des Abschaltens und des Betriebs von  $Q_A > Q$  Zufluss dargestellt. Mittels 1D-numerischer Simulationen können so Variantenstudien für komplexe Wasserschlossdesigns untersucht werden. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt der transienten Berechnung der Masseschwingung des Speicherstollensystems (3b – ohne Düker) für den Zeitpunkt 168 Sekunden. Das System wird auf  $Q_A$  angefahren. Abb. 3 a zeigt die Unterkammer und die Oberkammer des Speicherstollen-Wasserschlusses. Die Drossel generiert einen Differenzialeffekt. Da die Unterkammer sich in der Höhe mit dem Stollen überlappt kann bei entsprechender Auslegung ein Anfahren bis zum Erreichen eines Freispiegelabflusses im Stollen zugelassen werden. Eine Belüftung der Unterkammer sollte für diesen Fall vorgesehen werden. Abb. 3c zeigt den Längenschnitt des Speicherstollen wobei die Energiehöhe sich im Bereich der Stollenfiste befindet. Abb. 3d zeigt den Maschinendurchfluss für das Anfahren und einen idealen Betrieb mit  $Q_A =$  konstant.



**Abb. 3** 1D-numerische Simulation, Anfahren des Speicherstollen-Wasserschlusses

Die Überlaufkante des Wasserschloss-Hauptschachtes befindet sich auf der Höhenkante von 130 müA. Für den Fall des Abschaltens wird das Wasser aus dem Stollen maximal bis zu dieser Kote plus dem nötigen Überstau gedrückt um das Wasser über den Differenzialschacht in die tieferliegende Oberkammer abfließen zu lassen. Für diesen Zustand wirkt die Drossel als Dämpfungselement um das Wasser aus der Unterkammer zurückzuhalten. Somit wird die Oberkammer von zwei Fließrichtungen beaufschlagt. Dieser Differenzialeffekt der tiefen Oberkammer dämpft die Rückschwingung des Wassers zurück in den Stauraum.

### 3 Auslegungskriterien

Für die hydraulische Dimensionierung eines Speicherstollen-Wasserschloss folgende Teile mittels transienter Simulationen auszulegen:

- Unterkammer auf den ungünstigsten Öffnungsschaltfall so dass das Abreißen der Wassersäule im Stollen vermieden wird.
- Oberkammer auf den ungünstigsten Abschalt-Lastfall, in Zusammenhang mit der Drosseldimensionierung damit der Differenzialschacht nicht mit Wasser gefüllt wird.
- Die horizontale Wasseroberfläche in den Wasserschloss Kammern wird auf das Stabilitätskriterium ausgelegt, dabei ist auf die Betriebsdruckhöhen im Wasserschloss acht zu nehmen.

Anzumerken ist, dass zusätzliche 3D-numerische Strömungssimulationen und/oder physikalische Modellversuche empfohlen werden, um ein konkretes Design hydraulisch zu überprüfen.

### 4 Schlussfolgerung

Ein Speicherstollen-Wasserschloss soll die hydraulische Nutzung des Stollenvolumens in einem Wasserkraftwerk ermöglichen. 1D-numerische Berechnungen zeigen, dass ein zweckmäßig ausgelegtes Wasserschloss diese Funktion erfüllen kann. Dadurch wird ein Freispiegelabfluss im Stollen unabhängig der Maschinenschaltzeit ermöglicht.

### 5 Ausblick

Weitere Untersuchungen mittels 1D- und 3D-numerischer Simulationen sowie physikalischer Modellversuche kann weitere Designparameter verdeutlichen, um eine möglichst wirtschaftliche und bautechnisch zweckmäßige Wasserschlosskonstruktion zu definieren.

Der Einsatz von Speicherstollen-Wasserschlossern kann in Zusammenhang mit Schwall-Sunk Ausgleichsbecken die volumetrische und transiente Nutzung von Zu- und Ablaufstollen von Wasserkraftwerken bzw. Pumpspeicherkraftwerken ermöglichen, und so zu einer ökologischen und wirtschaftlichen Verbesserung beitragen.

### Danksagung

Thanks to my friend Kaspar Vereide and his students Eirik Leknes, Simon Sandvåg and Prof. Leif Lia from NTNU regarding our wonderful surge tank cooperation. Vielen Dank an Hugo Götsch für die spannenden Wasserschloss- und Stabilitätsdiskussionen.

### Literatur

Deltares. (2013). *Wanda 4.2, User Manual*. Delft.

Jaeger, C. (1949). *Technische Hydraulik*. Basel: Birkenhäuser.

Jaeger, C. (1958). Contribution to the Stability Theory of Systems of Surge Tanks.

Leknes, E. (2016). *Comparison of the Svee and Thoma Stability Criteria for Mass Oscillations in Surge Tanks*. Masterthesis, NTNU Trondheim.

- Richter, W., Schneider, J., Zenz, G., & Innerhofer, G. (2013). *Hybrid Modelling and Development of a long Upper Chamber in a Surge Tank*. Proceedings of Hydro Congress, Innsbruck.
- Richter, W., Schneider, J., Zenz, G., & Kolb, S. (2012). Hybrid Modelling of a Large Surge Tank. *Proceedings of 17th International Seminar on Hydropower Plants, Vienna*.
- Svee, R. (1972). *Fordelingsbasseng ved vannkraftverk; Formler til bestemmelse av svingegrenser og kritiske tverrsnitt, Surge tanks for hydropower plants – Equations for deciding the surge limits and critical areas (Bericht - Norwegisch)*. Trondheim.
- Thoma, D. (1910). *Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen*. Dissertation, Kgl. Technische Hochschule zu München: R. Oldenbourg.
- Wechtitsch, R. (2014). *Modellierung von Stollenspeicher*. Masterthesis, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Graz University of Technology.
- Widmann, W., Lebesmühlbacher, T., Eder, A., & Knorpp, K. (2015). Design and operation of the Stanzertal hydro power plant headrace tunnel as reservoir. *Hydro Congress*. Bordeaux.

### **Anschrift der Verfasser**

Dipl.-Ing. Wolfgang Richter  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz  
Stremayrgasse 10/2, 8010 Graz  
Wolfgang.Richter@tugraz.at

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Knoblauch  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz  
Stremayrgasse 10/2, 8010 Graz  
Helmut.Knoblauch@tugraz.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz  
Stremayrgasse 10/2, 8010 Graz  
Gerald.Zenz@tugraz.at