

Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat, Auslaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil

Conference Paper**Author(s):**

[Schroeder, Alice](#) ; [Billeter, Peter](#); [Boes, Robert](#) ; [Keller, Yves](#); [Lais, Adriano](#); [Stucki, Adrian](#)

Publication date:

2021

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000508188>

Rights / license:

[Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International](#)

Originally published in:

VAW-Mitteilungen 263

3906



Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat, Auslaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil

*Flood protection Sihl River, Lake Zurich, Limmat River –
 outlet structure of the Thalwil flood diversion tunnel*

**Alice Schroeder, Peter Billeter, Robert Boes, Yves Keller,
 Adriano Lais, Adrian Stucki**

Kurzfassung

Der Entlastungsstollen Thalwil soll die Stadt Zürich zukünftig vor extremen Hochwasserereignissen der Sihl schützen, indem er Hochwasserspitzen aus dem Sihltal in den Zürichsee bei Thalwil umleitet. Aufgrund der innerörtlichen Lage muss für das Auslaufbauwerk (ABW) eine Speziallösung gefunden werden, um die Energiedissipation bei begrenzten Platzverhältnissen sicherzustellen. Die Herausforderung bei der Dimensionierung des ABW besteht darin, den Wechselsprung trotz geringer Stützkräfte über dem Niveau des Zürichsees in der Toskammer zu fixieren und gleichzeitig den Lufteintrag in den anschliessend in den Zürichsee führenden Rechteckkanal zu minimieren.

In diesem Artikel wird der von der IUB Engineering AG konzipierte Entwurf des ABW beschrieben, der mithilfe eines physikalischen Modellversuchs an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich hydraulisch optimiert wurde. Dadurch konnten die Ziele der Stabilisierung des Wechselsprungs in der Toskammer und der Minimierung des Lufteintrags in den Rechteckkanal erreicht werden. Die Prüfung verschiedener Varianten im Modellversuch hat ein äusserst sensibles Systemverhalten bezüglich Einbauten sowie Höhe des Rückstaus durch den Zürichsee gezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden erläutert, um Anhaltspunkte für zukünftige Toskammerentwürfe zu liefern.

Abstract

The diversion tunnel is designed to protect the city of Zurich from extreme flood events by diverting the flood peaks from the Sihl Valley to Lake Zurich. Due to its location in the urban agglomeration in Thalwil, the available space for the outlet structure is limited. To ensure energy dissipation despite of these restrictions, the outlet structure, composed of a stilling chamber and an adjacent pressure tunnel requires a special solution. The challenge is to fix the hydraulic jump in the stilling chamber above the level of Lake Zurich in spite of low supporting forces and at the same time to minimize air entry into the following pressure tunnel.

This article describes the design of the outlet structure conceived by IUB Engineering Ltd., which was hydraulically optimized by means of a physical model test at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) of ETH Zurich. Thereby, the objectives of stabilizing the hydraulic jump in the stilling chamber and minimizing the air entrainment into the pressure tunnel were achieved. The study has shown that the system reacts very sensitively to various installations as well as to the level of Lake Zurich. The results are presented in this paper to provide an informative basis for future designs of stilling chambers and outlet structures.

1 Projektübersicht und hydraulischer Entwurf

Der Hochwasserentlastungsstollen Thalwil leitet einen Teil des Hochwasserabflusses der Sihl ab dem Einlaufbauwerk bei Sihlwald über einen gut 2 km langen Freispiegelstollen in den Zürichsee bei Thalwil (vgl. Abb. 1, Stucki *et al.*, 2021). Bei einem Dimensionierungsabfluss in der Sihl von $Q_{Sihl} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{500}) soll ein Abfluss von $Q_{d, Stollen} = 330 \text{ m}^3/\text{s}$ entlastet werden können (Wyss *et al.*, 2021). Je nach Abflusssituation liegt der Wasserspiegel beim Einlaufbauwerk auf rund 474 m ü.M. und der Zürichseepegel auf typisch 406 m ü.M. Beim Bemessungsabfluss ist im Auslaufbauwerk eine hydraulische Leistung von bis zu 60 MW möglichst weitgehend zu dissipieren, um so die Strömungsgeschwindigkeit an der Mündung und das Potential zur Wellenbildung zu begrenzen (die Mündungsgeschwindigkeit sollte im Mittel kleiner als ca. 4 m/s sein, was einer typischen Mündungsgeschwindigkeit bei Hochwasser eines Fließgewässers in einen See entspricht).

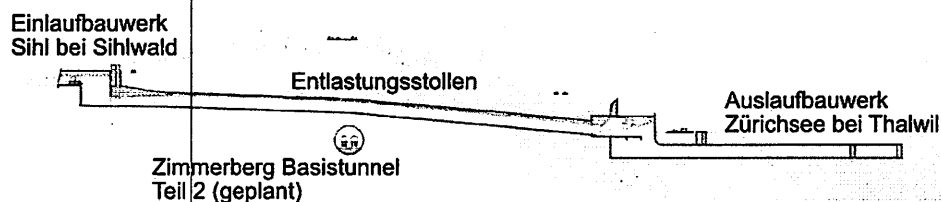


Abb. 1: Schematischer Längsschnitt des Entlastungsstollens Thalwil. (Quelle: Baudirektion Kanton Zürich)

Aufgrund der engen Platzverhältnisse am linken Zürichsee-Ufer wurde am Hangfuss eine Toskammer mit Wechselsprung und See-Ausfluss unter Druck entworfen, in der die Energiedissipation konzentriert werden kann (vgl. Abb. 2). Mit dem Bauwerk soll sichergestellt werden, dass für alle Randbedingungen von Entlastungsabflüssen und Seeständen weder der Freispiegelstollen zuschlägt noch der

Wechselsprung ausgeblasen wird. Die Kammer wurde so konzipiert, dass in einem oberen, durch einen Rost oder Leitelemente abgetrennten Teil der eigentliche Wechselsprung über dem Niveau des Zürichseespiegels stattfinden und die Abströmung unterhalb des Rosts mit reduzierter Energie und möglichst geringem Luftgehalt erfolgen kann.

Da rein rechnerisch die Funktionstüchtigkeit der vorliegenden «Grundlösung» hinsichtlich erforderlicher Anforderungen an Energiedissipation und Minimierung des Luftetrags nicht erbracht werden kann, wurde die VAW mit der Durchführung eines physikalischen Modellversuchs beauftragt.

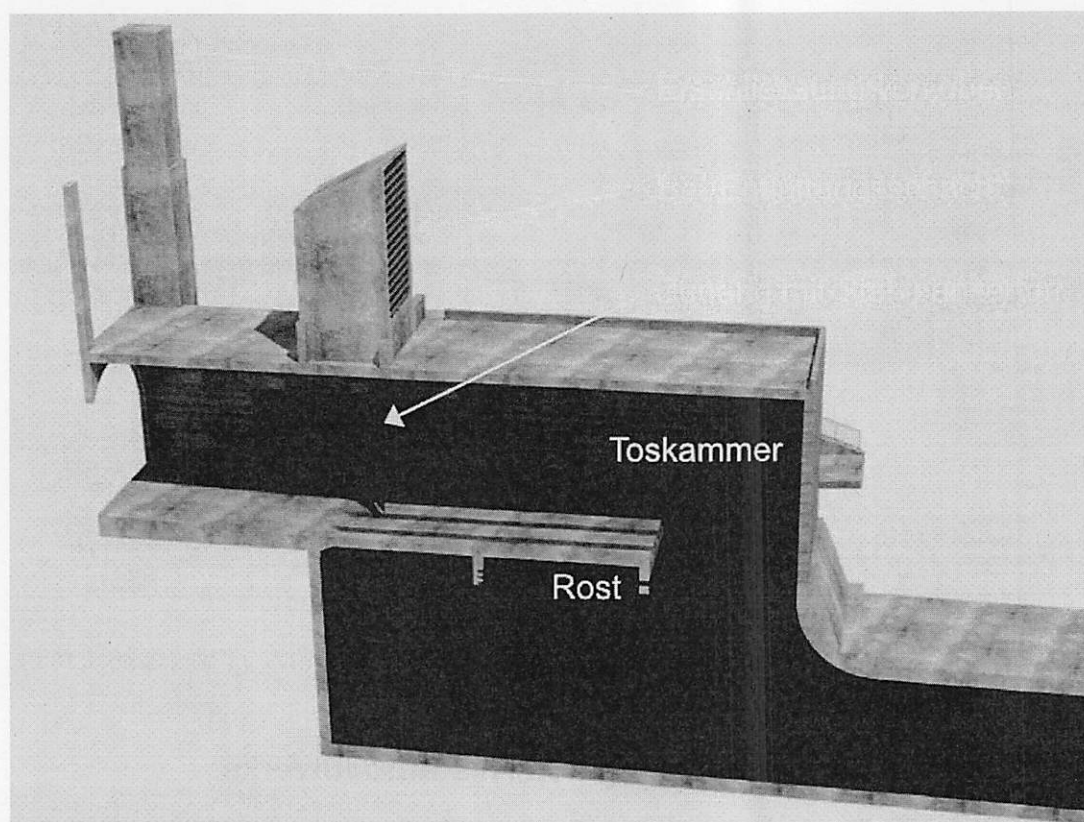


Abb. 2: Isometrische Darstellung der «Grundlösung» des Auslaufbauwerks. (Quelle: IUB Engineering AG)

2 Physikalisches Modell

An der VAW wurde das ABW als physikalisches Modell nach Froude'scher Ähnlichkeit im Massstab 1:16.92 errichtet (Abb. 3). Da bei gleichem Fluid im Prototyp und im Modell unter Anwendung der Froude'schen Modellähnlichkeit weder die Viskosität noch die Oberflächenspannung korrekt abgebildet werden, sind die Versuche an einem grossmassstäblichen Modell durchzuführen. Denn wie verschiedene Studien zeigen (u.a. Kobus, 1984; Speerli, 1999; Boes und Hager, 2003), sind für die korrekte Nachbildung der Energiedissipationsprozesse im

Wechselsprung sowie die Reduzierung der Modelleffekte des Wasser-Luft-Gemischs Massstabsfaktoren kleiner 15 resp. Reynolds-Zahlen (R) und Weber-Zahlen (W) von $R > 1 \cdot 10^5$ und $W > 100 - 110$ erforderlich. Im physikalischen Modell 1:16.92 betragen im Dimensionierungsabfluss $R = 1.2 \cdot 10^6$ und $W = 200$. Damit ist die Verzerrung des Lufteintrags stark vermindert.

Das Modell ermöglicht es, variable Einbauten, sowohl in der 34.4 m langen und 8 m breiten Toskammer als auch im 6.2 m, 8 m breiten und rund 200 m langen Rechteckkanal einzusetzen und so die Strömungsprozesse für die einzelnen Einbaukomponenten aufzuzeigen.

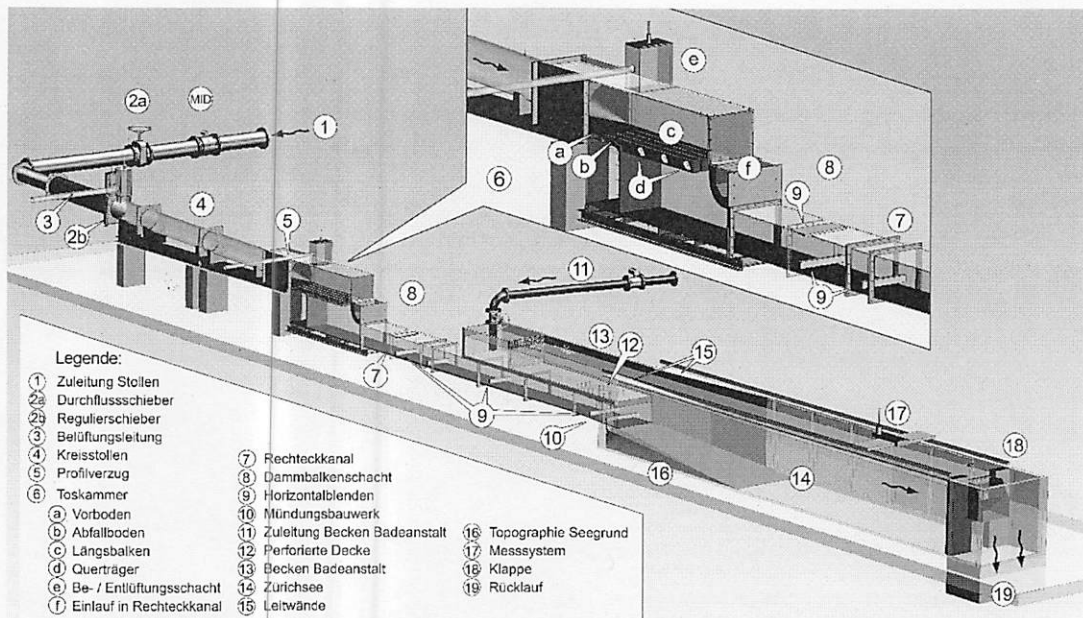


Abb. 3: Isometrische Darstellung des physikalischen Modells des ABW im Massstab 1:16.92 (optimierte Variante).

3 Hydraulische Optimierung des Auslaufbauwerks

Aufbauend auf der Variante «Grundlösung», die im Variantenstudium vielversprechende Ergebnisse erzielte, wurde die Toskammeroptimierung durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Einbauten auf die Energieumwandlung und den Lufteintrag untersucht. Die Modelluntersuchungen haben gezeigt, dass sich bei hohem Lufteintrag und geringer Stützkraft eine strömungstechnisch unerwünschte Schichtströmung im Rechteckkanal einstellt. Diese Schichtströmung erzwingt einen Wechselsprung im Rechteckkanal oder im Mündungsbauwerk und führt dadurch zu einer Energieumwandlung ausserhalb der Toskammer.

Damit die Energie des mit einer Geschwindigkeit von 15 m/s ($F = 2.6$) in die Toskammer eintretenden Strahls sicher über dem Rost der Länge 23.5 m dissipiert und der Wechselsprung so in der Toskammer fixiert werden kann, musste das

Grunddesign angepasst werden. Es wurde eine Lösung mit angepasstem Längsbalkenrost und abfallendem Einlaufboden in Kombination mit der Erhöhung der Stützkraft im Rechteckkanal gefunden. So wird durch eine Strahlauffächerung einerseits ein Horizontalstrahl Q_1 auf dem Längsbalkenrost erzeugt, mit dem die Energieumwandlung im Wechselsprung am Ende der Toskammer und über dem Niveau des Längsbalkenrosts resp. des Seespiegels erreicht wird. Andererseits bildet sich ein luftarmer Tauchstrahl Q_2 in den Wasserkörper der Toskammer aus, der zur Senkung des Lufteintrags in den Rechteckkanal beiträgt. Zudem soll das Auftreten von Lufträumen unter dem Längsbalkenrost und zwischen Wechselsprung und Wasserkörper vermieden werden um den Lufteintrag an rauen, freien Strahloberflächen zu verhindern (Abb. 4, Schnitt S-S).

Es wurden folgende Massnahmen in der Toskammer angegangen:

- Profilverzug des Entlastungstollens von Kreis- auf Torbogenprofil im Zulauf zur Toskammer
- Strömungstechnisch und konstruktiv günstiges, geschlossenes Profil der Längsbalken mit Abrundung der Oberkanten
- Strömungstechnisch günstiges Profil und Ausrichtung der Querträger
- Hoher Verbauungsgrad der Längsbalken (Abb. 4) zur Minderung des Impulsflusses ($v_2 \cdot Q_2 \cdot \rho$) zwischen den Längsbalken, sodass die Stützkraft in der Toskammer ausreichend gross ist resp. der Wasserstand y_p die Längsbalken einstaut (Vermeidung des Freifalls von Q_2 , indem der vertikale Abstand zum Unterwasser $t < 0$ und durch Anpassung Balkenhöhe a)
- Abfallboden zur optimalen Einleitung des Tauchstrahls in den Wasserkörper (Strahlauffächerung, Energiedissipation)
- Lichte Weite c im hinteren Bereich der Toskammer, damit der Lastabtrag des Wechselsprungs nicht über den Längsbalken, sondern über dem Wasserkörper erfolgt (Anhebung der Drucklinie). Diese Auflast wirkt der Trennung des Kontinuums zwecks Vermeidung freier Strahloberflächen entgegen.

Die optimierte Toskammer (Abb. 5a)) funktioniert nur einwandfrei in Kombination mit der Erhöhung der Druckkraft als Stützkraftanteil (y_t), was durch den Einbau von drei Horizontalblenden im Rechteckkanal und zwei Horizontalblenden im Mündungsbauwerk erreicht wird (Abb. 5b)). Durch die Energiedissipation im Nachlauf der Blenden werden zusätzliche Verluste erzeugt und dadurch die Drucklinie in der Toskammer angehoben resp. der Einstau der Balkenträger sichergestellt. Die Horizontalblenden haben einen Verbauungsgrad von knapp

20% und sind im unteren Drittel des Querschnitts angeordnet und damit im Vergleich zu anderen untersuchten Einbauten auf eine sichere Schwemmholzdurchleitung ausgelegt (Abb. 5b)).

Durch die Optimierung der Toskammer konnte die Luftkonzentration C_m im Rechteckkanal von 11% auf 3-4% gesenkt werden. Maximale Geschwindigkeiten des Wasser-Luft-Gemischabflusses wurden in der Fließachse in einer relativen Abflusstiefe von 0.7 messtechnisch erfasst und betragen bei $Q_{d, Stollen}$ 10 m/s.

Durch die Anordnung der zwei Horizontalblenden im Mündungsbauwerk kann ein in der «Grundlösung» und im Variantenstudium beobachteter Wechselsprung in der Aufweitung verhindert werden. Durch die turbulente Nachlaufströmung hinter den Horizontalblenden wird ein Teil der Luftblasen wieder in die Tiefe gerissen (Blasenströmung) während die über die Länge des Rechteckkanals aufgestiegene Luft unter der Decke in Form elongierter Blasen mit der Strömung transportiert wird. Die Luft wird damit einerseits als Blasenströmung in den Zürichsee abgegeben (Abb. 5b)), andererseits werden die unter der Decke transportierten Luftpakete durch Entlüftungsöffnungen in der Decke des Mündungsbauwerks flächig entgast (Abb. 5c)). Die flächige Entgasung über eine Vielzahl von Entlüftungsöffnungen wirkt sich positiv auf die Höhe der Aufpflanzungen der entgasten Luft aus, was zur Reduzierung der dadurch induzierten Wellen im Zürichsee führt.

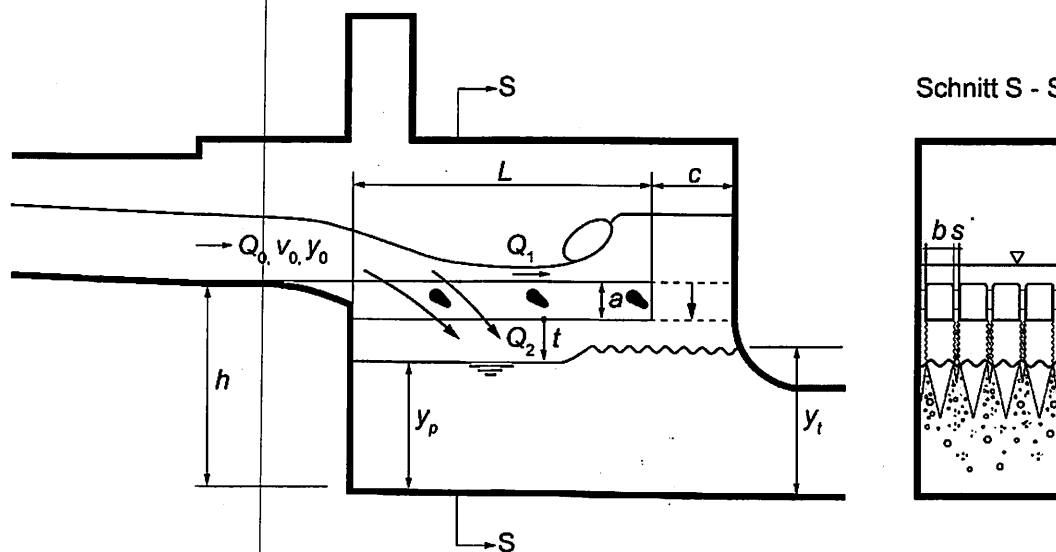


Abb. 4: Hydraulische Prinzipskizze der Toskammeroptimierung. Lufträume sollen vermieden werden, um eine Lufteinmischung an den rauen Strahloberflächen zu vermeiden. Der Impulsfluss zwischen den Balken wird dementsprechend klein gehalten.

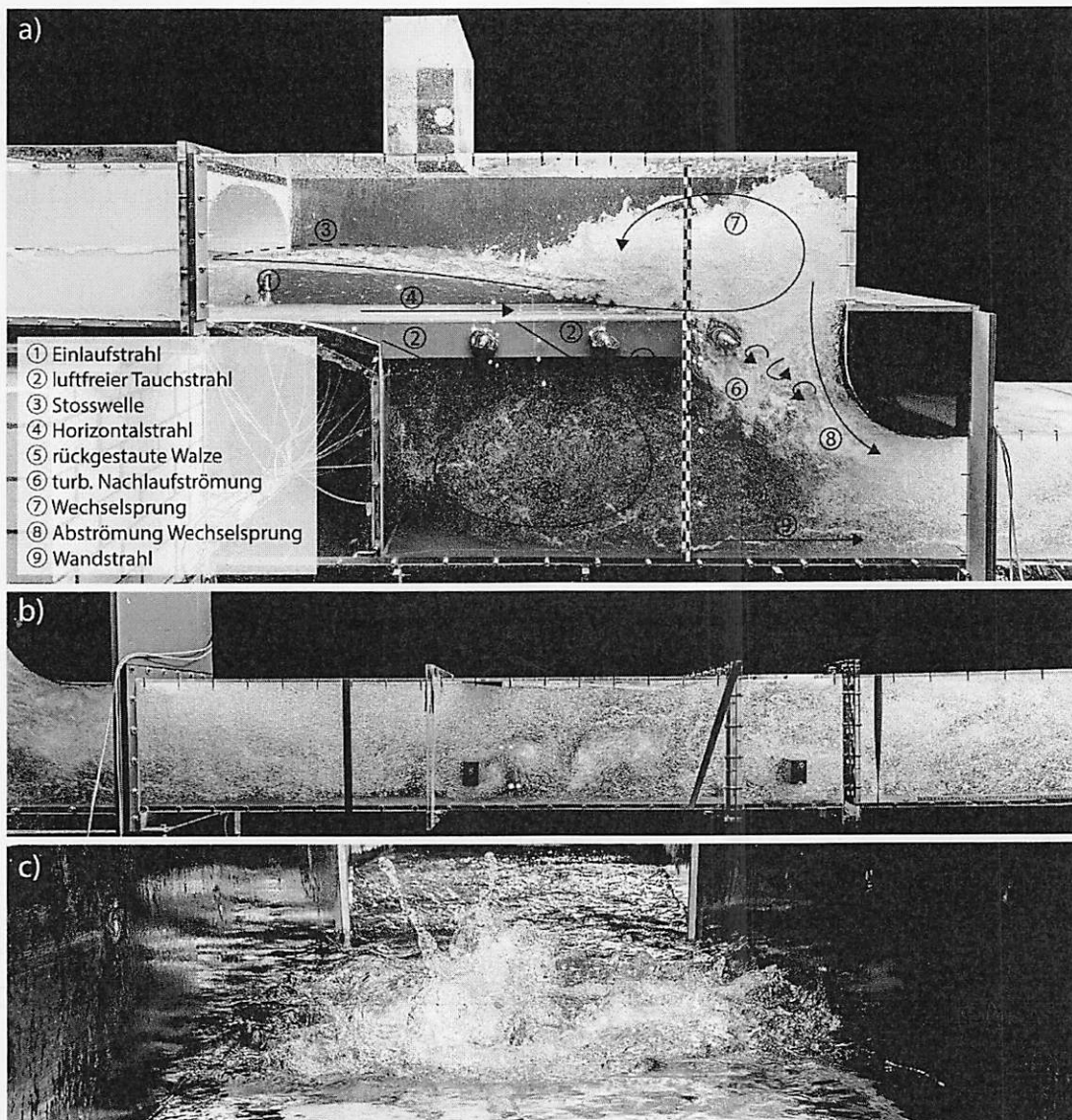


Abb. 5: Strömungsstrukturen im ABW exemplarisch anhand des Dimensionierungsabflusses $Q_{d, Stollen}$ bei Seespiegel 406.50 m ü.M. a) in der optimierten Toskammer, b) im Rechteckkanal: Dispergierte Blasenströmung und Wirbelstrasse im Bereich der ersten beiden Horizontalablenken, c) flächige Entgasung über Entlüftungsöffnungen in der Decke des Mündungsbauwerks.

4 Zusammenfassung

Die Modellversuche zum ABW sind abgeschlossen und haben gezeigt, dass die höchste Funktionalität des ABW durch die Reduktion des Luftaustausches an freien Wasseroberflächen in der Toskammer (Umströmung und Länge der Längsbalken) in Kombination mit einem Rückstau aus dem Rechteckkanal (Einstau der Längsbalken) erreicht wird. Die optimierte Variante zeigt gute Resultate in Bezug auf die Stabilisierung des Wechselsprungs in der Toskammer und die

Minimierung des Lufteintrags in den Rechteckkanal – und das für alle Abflüsse des Betriebsspektrums in Kombination mit verschiedenen Seeständen. Der Lufteintrag in den Rechteckkanal konnte jedoch nicht gänzlich unterbunden werden und führt im unter Druckabfluss betriebenen Rechteckkanal zu Strömungsbildern wie gewellter Schichtströmung oder elongierter Blasenströmung und zu Luftausstrag im Zürichsee.

Referenzen

- Boes, R.M. & Hager, W.H. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Jl. of Hydraulic Engineering* 129(9), pp. 661-670.
- Kobus, H. (1984). Local air entrainment and detrainment, Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures. Esslingen, Germany, pp. 4.10-1 – 4.10-10.
- Speerli, J. (1999). Strömungsprozesse in Grundablassstollen, VAW-Mitteilung Nr. 163, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, D. Vischer, ed., ETH Zürich.
- Stucki, A., Oplatka, M. (2021). Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat - Übersicht Gesamtprojekt und Entlastungsstollen Thalwil. Wasserbau-Symposium 2021, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Nr. 262-263*, ETH Zürich.
- Wyss, A., Billeter, P., Boes, R., Hinkelammert-Zens, F., Müller, M., Lais, A., Stucki, A. (2021). Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat - Einlaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil. Wasserbau-Symposium 2021, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Nr. 262-263*, ETH Zürich.

Adressen der AutorInnen

Alice Schroeder (korrespondierende Autorin)

Prof. Dr. Robert Boes, Adriano Lais

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich

CH-8093 Zürich, Höggerberggring 26

schroeder@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Peter Billeter, Yves Keller

IUB Engineering AG

CH-3000 Bern, Belpstrasse 48

Adrian Stucki

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich, Baudirektion

CH-8090 Zürich, Walcheplatz 2