

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 113 (2021)
Heft: 4

Artikel: Entlastungsstollen Thalwil : physikalische Modellversuche zum Auslaufbauwerk
Autor: Schroeder, Alice / Billeter, Peter / Boes, Robert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-966194>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Entlastungsstollen Thalwil – physikalische Modellversuche zum Auslaufbauwerk

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

Zusammenfassung

Der Entlastungsstollen Thalwil ist das Kernstück des Gesamtprojekts *Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee und Limmat* und soll die Stadt Zürich zukünftig vor extremen Hochwasserereignissen der Sihl schützen, indem er Hochwasserspitzen aus dem Sihltal in den Zürichsee bei Thalwil ableitet. Aufgrund der innerörtlichen Lage musste für das Auslaufbauwerk (ABW) des Stollens eine Speziallösung gefunden werden, um die Energiedissipation in der Toskammer des ABW bei begrenzten Platzverhältnissen sicherzustellen. Die Herausforderung bei der hydraulischen Bemessung des ABW bestand darin, den Wechselsprung trotz geringer Stützkkräfte über dem Niveau des Zürichsees in der Toskammer zu fixieren und gleichzeitig den Lufteintrag in den im Druckabflusszustand betriebenen, anschliessend in den Zürichsee führenden Rechteckkanal zu minimieren. Durch die Optimierung anhand eines physikalischen Modellversuchs an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich konnten die Ziele der Stabilisierung des Wechselsprungs in der Toskammer und der Minimierung des Lufteintrags in den Rechteckkanal erreicht werden. Das Testen verschiedener Varianten im Modellversuch zeigte ein äusserst sensitives Systemverhalten bezüglich diverser Einbauten im Bauwerk und der Wasserspiegellage des Zürichsees. Die gewonnenen Erkenntnisse werden erläutert, um Anhaltspunkte für zukünftige Toskammerentwürfe zu liefern.

Einleitung

Um die Stadt Zürich in Zukunft vor Hochwasserschäden zu schützen, wurde nach dem starken Hochwasserereignis in weiten Teilen der Schweiz im Jahr 2005 das Gesamtprojekt *Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee und Limmat* initiiert. Das Kernelement des Projekts bildet dabei der Entlastungsstollen Thalwil, der die Hochwasserspitzen aus der Sihl in den Zürichsee bei Thalwil ableiten soll. Eine detaillierte Darstellung des Gesamtprojekts und des Entlastungsstollens findet sich in *Stucki (2021)*.

Dieser Artikel befasst sich mit der hydraulischen Optimierung des durch die IG Sihl-Entlastungsstollen, c/o IUB Engineering AG entworfenen Auslaufbauwerks (ABW) anhand eines physikalischen Modellversuchs an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. Das ABW übernimmt die Funktion der Energiedissipation, um den schiessenden Stollenabfluss möglichst schonend in den Zürichsee einzuleiten. Es stellt folglich ein zentrales Bauwerk des Entlastungsstollens dar, dessen Funktions-

tüchtigkeit massgebend für das Funktionieren des Gesamtsystems ist.

Hydraulische Rahmenbedingungen

Der Entlastungsstollen ist auf ein 500-jährliches Hochwasserereignis bemessen, bei dem die Sihl einen Abfluss von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ führt. Der Restabfluss in der Sihl beträgt dabei ca. $270 \text{ m}^3/\text{s}$, sodass sich der Dimensionierungsabfluss Q_d für das ABW zu $330 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt. Als Überlastabfluss (ÜLF) gilt ein Extremhochwasser mit 700 bis $800 \text{ m}^3/\text{s}$. In *Wyss et al. (2021)* in diesem Heft findet sich eine im physikalischen Modell zum Einlaufbauwerk (EBW) des Entlastungsstollens ermittelte Trenncharakteristik von Stollenabfluss und Restabfluss in der Sihl. Diese zeigt, dass der Maximalabfluss im Stollen durch die Drosselwirkung im EBW auf einen Durchfluss von $355 \text{ m}^3/\text{s}$ im Überlastfall begrenzt ist. Dennoch wird für die Dimensionierung des Entlastungsstollens ein noch höherer Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ für den ÜLF bei einem Teilfüllungsgrad $Y=h/D$ von 0,77 im oberen, flacher geneigten Stollenabschnitt an-

gesetzt, mit h =lokale Abflusstiefe und $D=6,6 \text{ m}$ =Stolleninnendurchmesser.

Je nach Abflusssituation liegt der Wasserspiegel des Zürichsees auf $H_{S,min}=405,50 \text{ m ü.M.}$, $H_{S,m}=406,50 \text{ m ü.M.}$ oder $H_{S,max}=407,50 \text{ m ü.M.}$, wobei sich $H_{S,m}$ nicht auf den statistischen, mittleren Wasserstand des Zürichsees von $405,93 \text{ m ü.M.}$ bezieht, sondern auf den Mittelwert des untersuchten Seespiegelspektrums.

Im Zulauf zum ABW stellen sich Normalabflussbedingungen (Index N) im Entlastungsstollen ein. *Tabelle 1* zeigt für ausgewählte Durchflüsse Q im Stollen die Kenngrössen des Normalabflusszustandes: Normalabflusstiefe h_N ; Froude-Zahl F ; mittlere Fliessgeschwindigkeit v_N ; Energielinienlage H_{e0} und Teilfüllungsgrad Y_N .

	Q [m ³ /s]	h_N [m]	F [-]	v_N [m/s]	H_{e0} [m ü.M.]	Y_N [-]
	90	1,92	2,96	10,88	416,22	0,29
	200	2,96	2,85	13,44	420,42	0,45
Q_d	330	4,03	2,61	15,08	423,88	0,61
ÜLF	400	4,62	2,43	15,65	425,36	0,70

Tabelle 1: Normalabflussverhältnisse im unteren Abschnitt des Entlastungsstollens Thalwil.

Auslaufbauwerk

Das ABW wird in Thalwil grösstenteils unterirdisch errichtet und leitet die Hochwasserspitzen im Bereich des Seebads Bürger I und der ARA Zimmerberg in einer Entfernung von 90m zum Ufer in den Zürichsee. Es besteht im Wesentlichen aus einer Toskammer, einem im Druckabfluss betriebenen Rechteckkanal und einem Mündungsbauwerk mit Aufweitung und schliesst an den um 3,3 Prozent geneigten Entlastungsstollen an. Die Innenauskleidung des Stollens besteht im unteren, steiler geneigten Abschnitt aus gerippten Tübbing, deren raue Oberfläche hydraulisch mit einer äquivalenten Sandrauigkeit $k_s=1 \text{ cm}$ erfasst wird. Nachfolgend ist die von der IUB Engineering AG

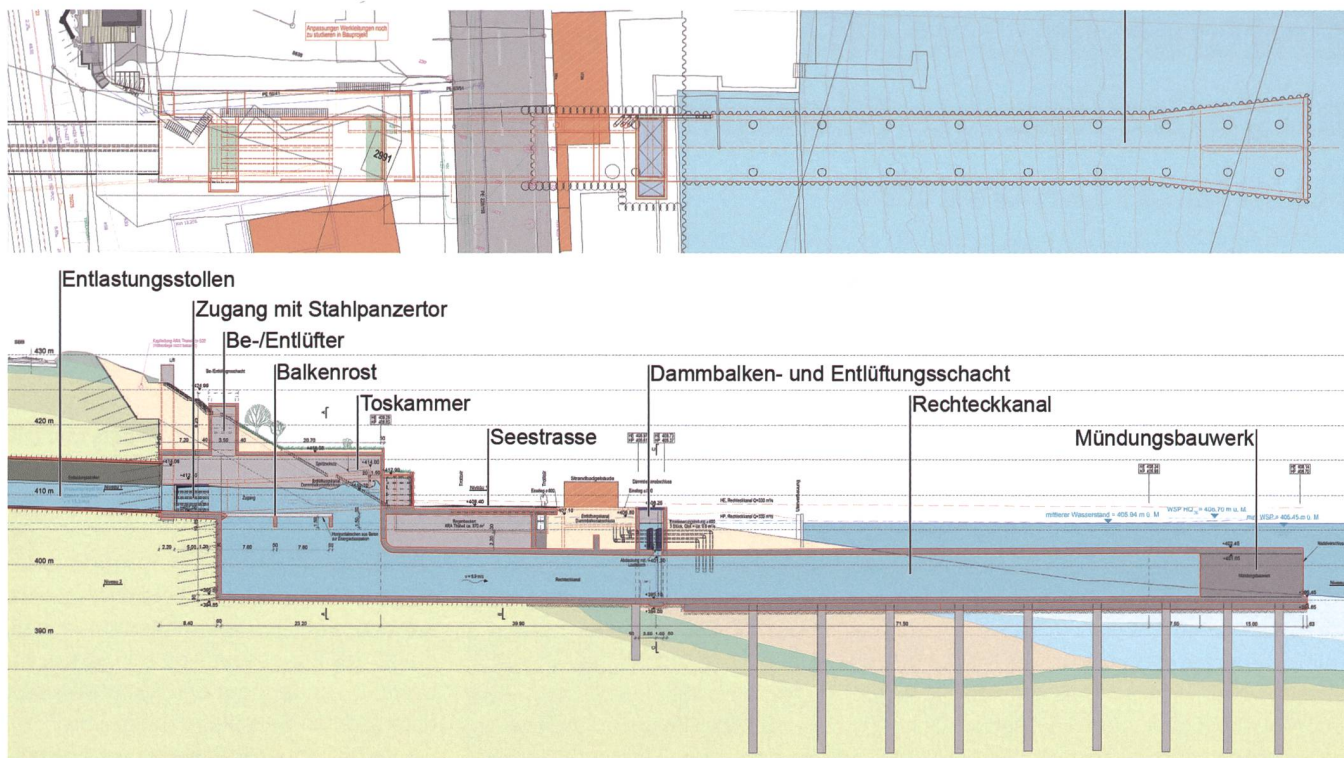


Bild 1: Übersicht und Längsschnitt der «Grundlösung» des Auslaufbauwerks, Stand Vorprojekt (Quelle: IG Sihl-Entlastungsstollen, c/o IUB Engineering AG, angepasst: VAW).

konzipierte «Grundlösung» des ABW beschrieben (Bild 1).

Nach einem abrupten Profilübergang des Kreisstollens zur rechteckigen, 8 m breiten, 20 m hohen und 32 m langen Toskammer folgt ein Vorboden mit Überfallnase und einem dahinterliegenden Balkenrost aus vier in Längsrichtung ausgerichteten Balken mit Trapezquerschnitt. Die Balken sind 16,2 m lang und reichen damit nicht bis zur rückseitigen Prallwand. Sie sind auf zwei rechteckigen Querträgern gelagert. Der mittlere Seewasserstand von 405,93 m ü. M. liegt unterhalb der Träger des Balkenrosts. Die über der Wasseroberfläche durch den Stollen transportierte Luft kann durch einen Be- und Entlüftungsschacht in der Toskammerdecke entweichen. Dieser Schacht dient ebenfalls zur Belüftung des Wechselsprungs.

Der Übergang der Toskammer in den 111 m langen, 6,2 m hohen und ebenfalls 8 m breiten Rechteckkanal ist mit einem Viertelkreis mit Radius 2 m ausgerundet. Der Rechteckkanal verläuft unterhalb der Toskammer zunächst mit einem Gefälle von 0,87 Prozent abschüssig und erfährt im weiteren Verlauf einen Knick, nach welchem der Kanal bis zur Mündung ins Seebecken mit 0,37 Prozent ansteigt. Über dem Tiefpunkt des Rechteckkanals befindet sich ein Dammbalkenschacht, der multifunktional auch der Entlüftung dient.

Das Endbauwerk gestaltet eine 22,5 m lange Mündungstrompete, in der der Quer-

schnitt von 8 m auf 13 m aufgeweitet und infolgedessen der Ausfluss in den Zürichsee abgebremst wird. Die Decke des Mündungsbauwerks ist durch einen Trennpfeiler in Längsrichtung abgestützt und ihre Unterseite liegt 4,28 m unter dem mittleren Seewasserstand.

Problemstellung

Der Entlastungsstollen mündet über dem Niveau des Zürichsees in die Toskammer und weist mit 15 m/s im Bemessungslastfall hohe Fließgeschwindigkeiten auf. Die Energiehöhe vor dem Bauwerk liegt damit 18 m WS über dem mittleren Seespiegel, sodass eine Leistung von 55 MW dissipiert werden muss. Dies und die Tatsache, dass die Toskammer aufgrund der innerörtlichen Hanglage nicht ausreichend lang ausgeführt werden kann, machen eine Speziallösung zur Sicherstellung der Energiedissipation notwendig. Die Unterquerung der Seestrasse im Anschluss an die Toskammer und die Einleitung in den Zürichsee in einer Tiefe von ca. 7,4 m unterhalb des mittleren Seespiegels stellen das Projekt vor weitere hydraulische Probleme. Die Mündungsgeschwindigkeit sollte im Mittel kleiner als ca. 4 m/s sein, was einer typischen Mündungsgeschwindigkeit eines Fließgewässers in den Zürichsee bei Hochwasser entspricht. Die Austrittsgeschwindigkeit beeinflusst die Resuspensionsprozesse von Seesedimenten auf-

grund der vorhandenen Bathymetrie, die Charakteristik des sich in den Zürichsee ausbreitenden Tauchstrahls und damit auch die seitlichen Zuströmgeschwindigkeiten zum Austrittsstrahl im Uferbereich. Letztere sowie die Dichtereduktion infolge hohen Luftgehalts und Fontänenbildung beim Austritt in den Zürichsee stellen eine potenzielle Gefährdung von Personen und Schifffahrt dar, weshalb ein grosses Augenmerk der Untersuchung auf der Minimierung des Lufteintrags in den Rechteckkanal lag. Eine Entlüftung des Wasser-Luft-Gemisches war im Vorprojekt über den Dammbalkenschacht vorgesehen, wurde aber im weiteren Verlauf des Projekts verworfen.

Die Schwierigkeit bei der Gestaltung und Optimierung des ABW bestand darin, den Wechselsprung trotz geringer Stützkraft über dem Niveau des Zürichsees zu fixieren, um die erforderliche Energiedissipation zu gewährleisten und gleichzeitig den Lufteintrag in den Rechteckkanal zu minimieren, um fontänenartige Entgasungszustände zu verhindern.

Zudem kann es trotz Rückhaltemassnahmen in der Sihl (Schwemmholzrechen Rütiboden) und am EBW (Grobrechen und Tauchwand) zu Schwemmholzeintrag in den Entlastungsstollen kommen (Wyss et al., 2021, in diesem Heft). Dieser darf keine Funktionalitätseinbußen des ABW bspw. durch einen unzulässigen Aufstau infolge Verklauung hervorrufen, sodass die sichere

Schwemmholzdurchleitung eine weitere Anforderung an die Optimierung stellte.

Vorstudien der IUB Engineering AG zeigten, dass die Optimierung des ABW unter den erwarteten, oben genannten Strömungsprozessen zwingend eines grossskaligen physikalischen Modellversuchs bedurfte. Aus diesem Grund wurde die VAW mit der Durchführung dieses physikalischen Modellversuchs beauftragt.

Hydraulische Modellversuche an der VAW

Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Untersuchung wurde an einem physikalischen Modell nach Froud'scher Ähnlichkeit im Massstab 1:16.92 durchgeführt, um die oben genannten Prozesse möglichst frei von Massstabeffekten abbilden zu können. Der Perimeter umfasste bei diesem Massstab 100m des Entlastungstollens, die Toskammer, den daran anschliessenden und unter Druck betriebenen Rechteckkanal, das Mündungsbauwerk mit Aufweitung und den Mündungsbereich in das Seebecken auf einer Länge von 135m. Der Freispiegelabfluss im Entlastungstollen wurde durch zwei in Reihe geschaltete Schieber erzeugt und die Luftzufuhr im Stollen über eine dahinterliegende Belüftungsleitung sichergestellt. Das Seebecken wurde im Schnittmodell der VAW als 21 m breite Seelamelle mo-

delliert. Innerhalb dieses Modellperimeters konnte mithilfe von Einbauten das hydraulische Verhalten des Auslaufbauwerks untersucht und optimiert werden.

Die eingesetzte Messtechnik bestand aus magnetisch-induktivem Durchflussmesser, Hitzedrahtanemometern, piezoresistiven Relativdruckmessgebern, Luftdrucksonden, faseroptischer Sonde, ADV-Sonde (Acoustic Doppler Velocimeter) und Ultraschallsensoren.

Zur Untersuchung der Seeströmung wurde zudem ein bestehendes 8 m langes und 4,5 m breites Becken der VAW hinzugezogen, um Erkenntnisse über die Strahlcharakteristik im Fernfeld der Einleitung und im Uferbereich zu ermitteln. Dieses bildete die Ausleitung der Strömung über die flach abfallende Seeterrasse in den Zürichsee im Massstab 1:143 ab. Es diente vornehmlich der Validierung und Plausibilisierung der im Schnittmodell beobachteten Vorgänge in der Lamelle des Zürichsees und der 2D-Simulation des von der IUB Engineering AG numerisch modellierten Seebereichs von 1000 m x 1800 m Fläche vor Thalwil.

Untersuchung der Grundlösung

Die Untersuchung der Grundlösung zeigte gute Ergebnisse in Bezug auf die Energiedissipation. Der Balkenrost und die Überfallnase führen eine Strahltrennung herbei. Auf dem Balkenrost verläuft der Strahl ho-

rizontal als Oberflächenstrahl in Richtung Prallwand, während er zwischen den Längsbalken in die Tiefe abtaucht. Der Verbauungsgrad $P=4 \cdot b/B$ dient dabei als Steuerparameter dieser beiden Teilabflüsse und beträgt 62,5 Prozent, mit b =Breite eines Balkenrostes und B =Toskammerbreite (Bild 3). Die Energieumwandlung funktionierte in den meisten Lastfällen, da ein hoher Teilabfluss auf die Prallwand trifft und die Energie in einem Wechselsprung auf dem Balkenrost dissipiert (Bild 2a). Bezüglich der Reduzierung des Lufteintrags in den Rechteckkanal hatte die Grundlösung jedoch Optimierungspotenzial.

In der Toskammer reisst die Strömung sehr viel Luft an rauen Strahloberflächen mit sich, die teils in den Abfluss eingemischt wird und in den Rechteckkanal gelangt. In Lastfällen mit hohem Stollenabfluss und geringer Stützkraft (mittlerer und niedriger Wasserspiegel H_s des Zürichsees) bildet sich sogar eine strömungstechnisch unerwünschte Schichtströmung im Rechteckkanal zwischen der Toskammer und dem Dammbalkenschacht aus (Bild 2a). In der Grundlösung entweicht die Luft über die Dammbalkenöffnung an die freie Atmosphäre. Dieser Luftaustrag führt einen Wechselsprung im Rechteckkanal herbei (Bild 2a). Ein beachtlicher Energieanteil dissipiert damit ausserhalb der Toskammer. Der hohe Luftaustrag, z.B. von 25 m³/s bei Q_d , verdrängt das Wasser im Schacht teils

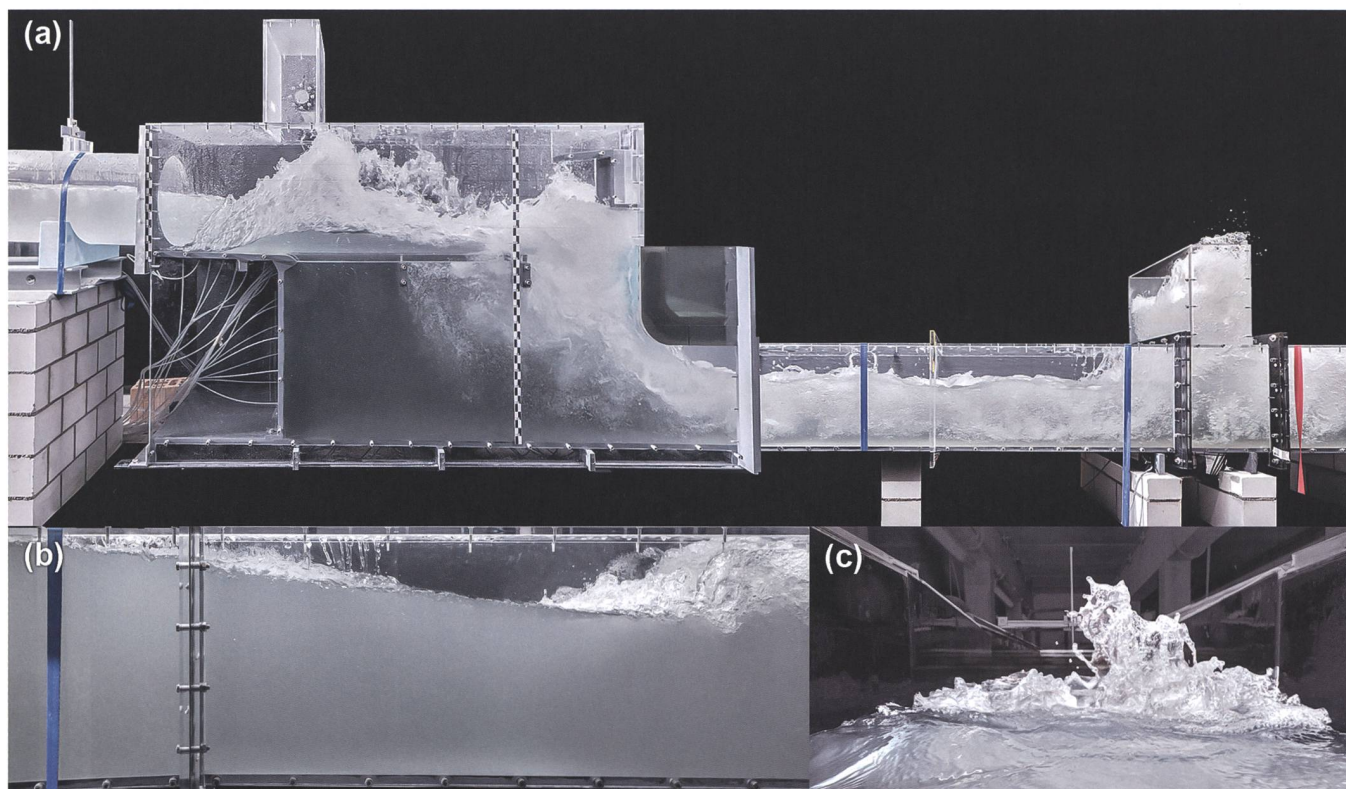


Bild 2: Strömungsstrukturen der Grundlösung des ABW für den Dimensionierungsabfluss a) in der Toskammer, b) im Mündungsbauwerk und c) mit geysirhafter Entlüftung bei der Mündung in den Zürichsee.

auf das umliegende Terrain (Bild 2a). Im Bemessungslastfall wurde ein Eintrag von Luft aus der Toskammer in den Rechteckkanal von $55 \text{ m}^3/\text{s}$ beobachtet, was einer Lufteintragsrate $\beta = 16$ Prozent entspricht ($C_m = 14$ Prozent). Die mittlere Luftkonzentration C_m nach der Entlüftung durch den Dammbalkenschacht beträgt noch rund 9 Prozent.

Die Luftblasen steigen im Verlauf des Rechteckkanals allmählich mit einer Blasensteiggeschwindigkeit u_b von 10 cm/s auf (Kramer et al., 2005; Arch et al., 2006). Der Aufstieg der Luftblasen setzt graduell ein, sodass die Trennung der beiden Phasen erst nach einer gewissen Abschlagslänge L_{ka} erfolgt (vgl. Bild 3). Die sich unter der Decke ansammelnden Blasen werden als elongierte Blasen transportiert. Die Entgasungs- resp. die Entwicklungslänge ist zu lang, als dass sich der Gleichgewichtszustand im Grenzbereich zwischen Schichtströmung und elongierter Blasenströmung (plug flow) im Rechteckkanal ausbilden könnte (Mandhane et al., 1974). Die elongierten Blasen bewirken, dass sich die Strömung im seitlich aufweitenden Mündungsbauwerk von der Decke ablöst (Bild 2b). In der Folge senkt sich der Wasserspiegel, und das Abflussbild in der Aufweitung gleicht dem einer Freispiegelströmung. Die elongierten Blasen erfahren eine verzögerte Bewegung und sammeln sich zu einer grossen, stationären Lufttasche. Die Wasserströmung geht in den schiessenden Abflusszustand über, wonach abrupt der Fließwechsel in Form

eines weiteren Wechselsprungs nach der Lufttasche erfolgt. Die Luft entweicht am Ende des Mündungsbauwerks u.a. in Form pulsationsartiger, geysirhafter Fontänen an der Wasseroberfläche des Zürichsees (Bild 2c).

Einfluss einzelner Optimierungs-massnahmen und Darstellung der optimierten Variante

Das Toskammer-Design der Grundlösung lieferte eine gute Basis bzgl. der Energie-dissipation und wurde an der VAW als Ausgangsdesign für eine Optimierung herangezogen. Während der Projektierungsphase wurde die Öffnung des Dammbalkenschachts mit einem Druckdeckel geschlossen und damit die Entlüftung des Druckabflusses vor der Mündung in den Zürichsee unterbunden. Daher verschob sich der Fokus der Optimierung noch weiter auf die Minimierung des Lufteintrags in den Rechteckkanal. Im Rahmen eines Variantenstudiums wurde deshalb der Einfluss verschiedener Einbauten auf die Energieumwandlung und den Lufteintrag untersucht. Dabei wurde ein äusserst sensitives Systemverhalten bezüglich dieser Einbauten sowie der Wasserspiegellage des Zürichsees beobachtet.

Die Optimierung brachte eine Lösung mit angepasstem Längsbalkenrost und abfallendem Einlaufboden in Kombination mit der Erhöhung der Stützkräfte im Rechteckkanal (Bild 3 und Bild 4) als Bestvariante hervor. Die Strahlauffächerung $Q_w = Q_1 + Q_2$ generiert einen Horizontalstrahl Q_1

auf den Längsbalken, der beim Aufprall auf die rückseitige Prallwand einen Wechselsprung über dem Niveau der Längsbalken resp. des Seespiegels bildet und damit zur Energieumwandlung beiträgt. Daneben taucht ein luftarmer Tauchstrahl Q_2 in den Wasserkörper der Toskammer ein, der den Lufteintrag Q_a in den Rechteckkanal senkt.

In der Grundlösung wurde beobachtet, dass Lufträume unter dem Längsbalkenrost sowie zwischen dem Wechselsprung an der Prallwand und dem darunterliegenden Wasserkörper den Lufteintrag erhöhen. Durch die Vermeidung dieser Lufträume in der optimierten Variante kann der Lufteintrag an rauen, freien Strahloberflächen verhindert werden.

In der Toskammer waren im Detail folgende Massnahmen zur strömungstechnischen Optimierung erfolgreich (Bild 3):

- Profilverzug des Entlastungsstollens von Kreis- auf Torbogenprofil im Zulauf zur Toskammer zur Vermeidung hoher Stosswellen resp. zusätzlicher Strahloberflächen;
- Strömungstechnisch günstiges Profil der Längsbalken mit Abrundung R der Oberkanten, um Strömungsablösungen zu vermeiden. Vollprofil-Längsbalken zur Vermeidung von Tornado-wirbeln im Hohlkasten der Längsbalken;
- Strömungstechnisch günstiges Tropfenprofil und Ausrichtung der Querträger um einen Winkel α zu den Längsbalken in die Strahltrajektorie von Q_2 , um Strömungsablösungen zu begegnen;

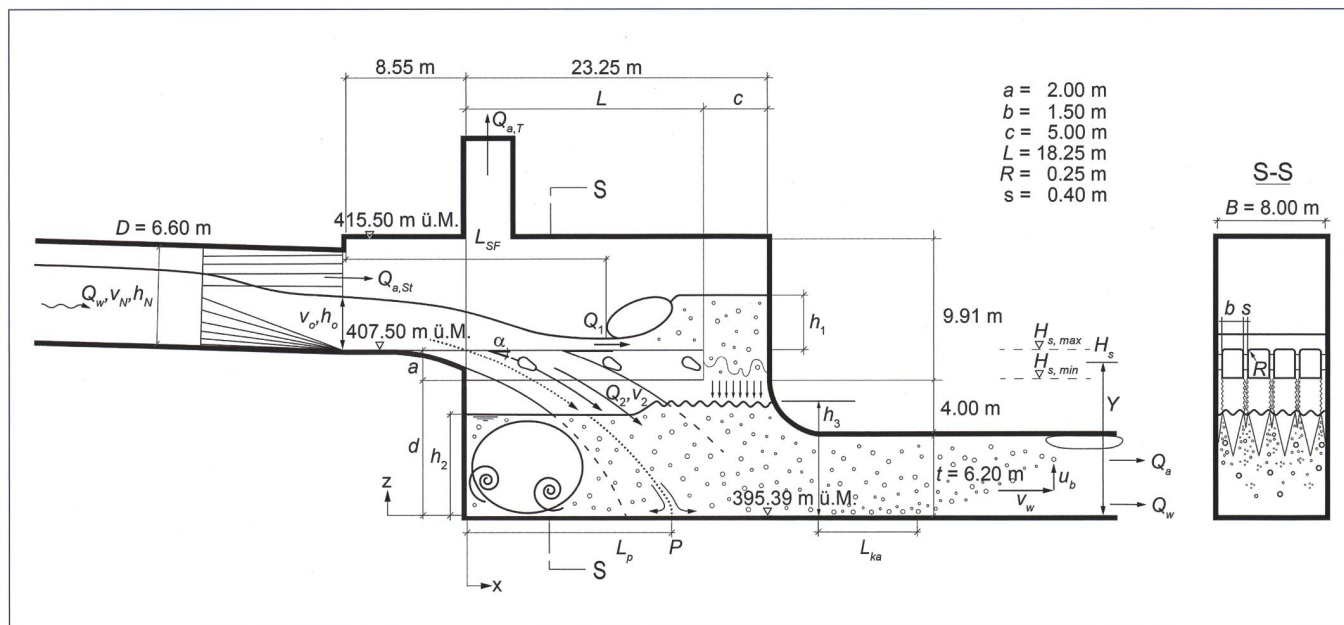


Bild 3: Hydraulische Prinzipskizze der Toskammeroptimierung und Vermassung der optimierten Variante. Lufträume im Bereich der Längsbalken sollen vermieden werden, um die Lufteinmischung beim Eintauchen der Strahlen in den Wasserkörper zu vermeiden. Der Impulsfluss zwischen den Balken wird über den Verbauungsgrad P entsprechend klein gehalten, was den Einstau der Längsbalken begünstigt.

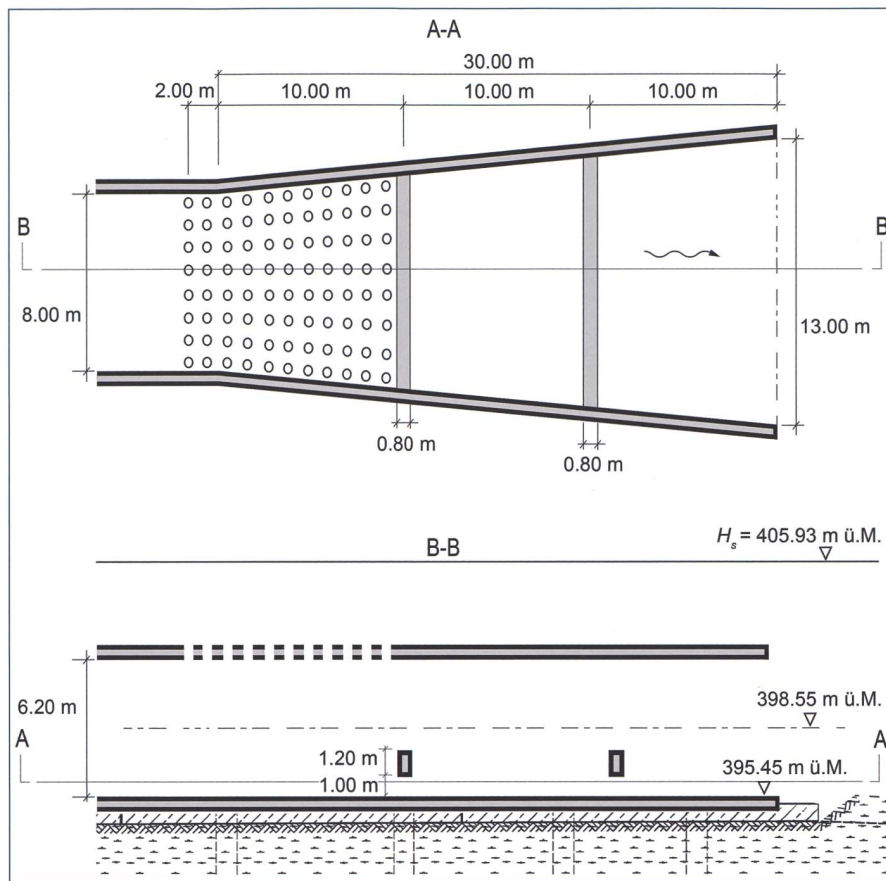


Bild 4: Mündungsbauwerk mit Aufweitung, perforierter Decke zur flächigen Entgasung und zwei Horizontalblenden für die Rekuperation von kinetischer Energie in Druck.

- Erhöhung des Verbauungsgrads P des Balkenrostes zur Minderung des Impulsflusses $v_2 \cdot Q_2 \cdot \rho$ zwischen den Längsbalken, sodass die Längsbalken durch den Wasserstand h_2 eingestaut sind (Vermeidung des Freifalls von Q_2 durch $(h_2 - d) > 0$, mit d = lichte Höhe unter den Balkenrosten, und Anpassung der Balkenhöhe a , UK Balken auf $H_{s,min}$);
- Abfallender Einlaufboden in die Toskammer zur optimalen Einleitung des Tauchstrahls in den Wasserkörper (Strahlauffächerung, Energiedissipation). Überfallprofil entspricht der unteren Strahltrajektorie für $Q_w = 200 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Indem die Balkenroste nicht die gesamte Toskammerlänge einnehmen, entsteht eine lichte Weite c im hinteren Bereich der Toskammer, damit der Lastabtrag des Wechselsprungs nicht über die Längsbalken, sondern im Wesentlichen über dem Wasserkörper erfolgt (Anhebung der Drucklinie h_3). Dies verhindert freie Strahloberflächen und vermindert somit den Lufteintrag in den Rechteckkanal. Zudem stellt die lichte Weite c die Schwemmholzdurchleitung im hinteren Bereich der Toskammer sicher;

- Lage des Sprungfusses L_{SF} innerhalb der Kammer, sodass die Luftströmung $Q_{a,st}$ aus dem Entlastungsstollen in die Kammer und der Luftaustrag $Q_{a,T}$ aus dem Entlüftungsschacht für alle Lastfälle gewährleistet bleibt (unbehinderte Luftzirkulation über der Wasseroberfläche). Lage des Entlüftungsschachts nahe dem Eintritt in die Toskammer.

Die optimierte Toskammer funktioniert einwandfrei in Kombination mit der Erhöhung der Druckkraft h_3 als Stützkraftanteil, was durch den Einbau von drei Horizontalblenden im Rechteckkanal und zwei Horizontalblenden in der Aufweitung des Mündungsbauwerks erreicht wird (Bild 4). Die Horizontalblenden im Rechteckkanal sind mit gewissem Abstand hintereinander und im unteren Drittel der Kanalhöhe angeordnet, um bei Schwemmholzdurchleitung nicht zu verlegen. Durch die Energiedissipation im Nachlauf der Blenden wird die Drucklinie h_2 in der Toskammer angehoben und so der Einstau der Balkenträger sichergestellt. Die beiden Horizontalblenden im Mündungsbauwerk verhindern zudem einen in der Grundlösung und im Variantenstudium beobachteten Wechsel-

sprung in der Aufweitung (Bild 2b) und heben die Drucklinie über das Niveau des Seespiegels an. Die erforderlichen Energiedissipationsprozesse erfolgen demnach anteilmässig in der Toskammer, dem Rechteckkanal und dem Mündungsbauwerk (kombiniertes Bauwerk zur Energiedissipation). Der prozentuale Anteil der Energie, die in der Toskammer dissipiert wird, zur total zu dissipierenden Energiehöhe (ohne Anteil der Strahldissipation im Zürichsee) nimmt mit zunehmendem Durchfluss stark ab. Während bei $90 \text{ m}^3/\text{s}$ der Anteil in der Toskammer noch 97 Prozent beträgt, sinkt er bei $200 \text{ m}^3/\text{s}$ auf 88 Prozent und beim Dimensionierungsabfluss von $330 \text{ m}^3/\text{s}$ auf 68 Prozent. Im Überlastfall mit $400 \text{ m}^3/\text{s}$ sind es noch 57 Prozent. Die Horizontalblenden übernehmen dabei im Wesentlichen die restliche Energiedissipation. Die angegebenen Werte sind als Richtgrößen zu verstehen (Abschätzung ohne Berücksichtigung von Druck- und Geschwindigkeitshöhenausgleichswerten).

Im Zuge der Optimierung wurde die Decke des Mündungsbauwerks perforiert (Bild 4), um die unter der Decke transportierten, elongierten Blasen flächig über diese Perforation entgasen zu lassen und damit einem lokal konzentrierten geysirartigen Luftaustrag an der Mündung möglichst zu begegnen (Bild 2c).

Strömungsstrukturen im optimierten Auslaufbauwerk

In der Toskammer sind im Wesentlichen zwei unterschiedliche Strömungsstrukturen zu unterscheiden, die entweder (a) von der Charakteristik des Tauchstrahls Q_2 bei kleinen (Bild 5a) oder (b) vom Oberflächenstrahl Q_1 bei hohen Durchflüssen geprägt sind (Bild 5b–d).

Der Teilabfluss Q_2 wird in (a) über den gekrümmten Abfallboden und zwischen den abgerundeten Längsbalken ablösefrei in die Tiefe gelenkt (Tauchstrahl). Der abtauchende Strahl reisst infolge der strömungstechnisch günstigen Umströmung und des Einstaus der Längsbalken einzig Luft an seiner Oberfläche mit und mischt diese in das Wasser ein. Die Eindringtiefe der Luftblasen wird dabei auch bei dem kleinsten untersuchten Abfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ durch die Sohle der Toskammer behindert (Ervine et al., 1987; Hager, 1995). Luftblasen schlagen bis zur Sohle durch und gelangen dabei u.a. in den Einflussbereich des unterstromigen Wandstrahls (Bild 5). Der Tauchstrahl teilt sich beim Auftreffen auf der Sohle im Stagnationspunkt P in zwei Wandstrahlen (vgl. Bild 3). Es bilden sich

in der Folge bei (a) beidseits des Tauchstrahls zwei Primärwirbel (Hager, 1995).

Mit zunehmendem Abfluss und sich aufstellendem Strahl wandert der unterstromige Primärwirbel zur Prallwand der Toskammer (Bild 5b). Gleichzeitig nimmt auch der Abflussanteil des Oberflächenstrahls Q_1 zu. Während bei den kleinen Abflüssen in (a) noch ein kleiner Restabfluss am Ende der Längsbalken ins Wasserpelster abstürzt (Bild 5a), prallt der Oberflächenstrahl bei höheren Abflüssen an die Prallwand, und es bildet sich das Strömungsmuster (b) mit einem Wechselsprung an der Prallwand aus. Dabei dreht unterhalb der eingestauten Längsbalken eine grosse, rückgestaute Walze um die eigene Achse mit dem Rotationszentrum auf halber Höhe der lichten Höhe unter den Balkenrosten, d.h. bei $d/2$ (vgl. Bild 3). Im Wandstrahl dieser Walze werden grössere, kohärente Wirbelstrukturen bewegt. Grössere Stützkräfte, die sich in der Toskammer z.B. durch höhere Wasserspiegellagen im Zürichsee ergeben, bewirken, dass sich der Tauchstrahl im Wasserpelster aufstellt und in einer grösseren Entfernung L_P auf die Sohle der Kammer

trifft. Dies hat zur Folge, dass sich der oberstromige Primärwirbel resp. die rückgestaute Walze ausdehnt.

Mit zunehmendem Abfluss wandert der Wechselsprung auf dem Balkenrost gegen die Fliessrichtung, wobei sein Sprungfuss L_{SF} im ÜLF und bei maximalem Seespiegel im Profilübergang vor der Toskammer zu liegen kommt (Bild 5d). Ein Zuschlagen des Torbogenprofils und des Entlüftungsschachts wird hierbei wiederholt beobachtet. Die Kapazitätsgrenze ist erreicht, die Abflussverhältnisse im Entlastungsstollen Thalwil sind aber noch stabil, die freie Luftzirkulation sichergestellt.

Die Abströmung nach dem Wechselsprung führt bei höheren Durchflüssen sehr viel fein dispergierte Luft mit sich. Sie wird an der Sohle der Toskammer umgelenkt, vereinigt sich mit dem rechtsseitigen Wandstrahl und wird in Form einer dispergierten Blasenströmung in den Rechteckkanal eingeleitet.

Die Strömung im Einlauf zum Rechteckkanal ist über die Höhe mit Luftblasen durchsetzt. Die in der optimierten Variante eingesetzten Horizontalblenden sorgen dafür, dass aufsteigende Blasen durch die

kohärenten Wirbelstrukturen in der Nachlaufströmung der Blenden wieder in die Tiefe gerissen werden, sodass bei hohen Abflüssen im Modell weder ein kontinuierlicher Blasenaustieg über die Höhe auf der Länge des Rechteckkanals noch die Abschlagslänge L_{ka} wie bei der Grundlösung beobachtet wird (Bild 6a). Somit wird die Luft einerseits als Blasenströmung in den Zürichsee abgegeben (Bild 6b), andererseits entgasen die unter der Decke transportierten Luftpakete im Uferbereich flächig durch die perforierte Decke des Mündungsbauwerks (Bild 6c). Die flächige Entgasung über eine Vielzahl von Entlüftungsöffnungen bewirkt eine geringere Höhe der Aufpflungen durch entgasende Luft im Vergleich zu zuvor beobachteten Fontänen, was auch zu einer Reduzierung der dadurch induzierten Wellen im Zürichsee führt. Die dispergiert verteilten Luftblasen werden mit dem Austrittsstrahl weit in den Zürichsee hinausgetragen, da sie in der Wirbelstrasse nach den Blenden in Turbulenzstrukturen bewegt werden.

Das aus dem Sihltal umgeleitete Wasser tritt im Dimensionierungslastfall mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von

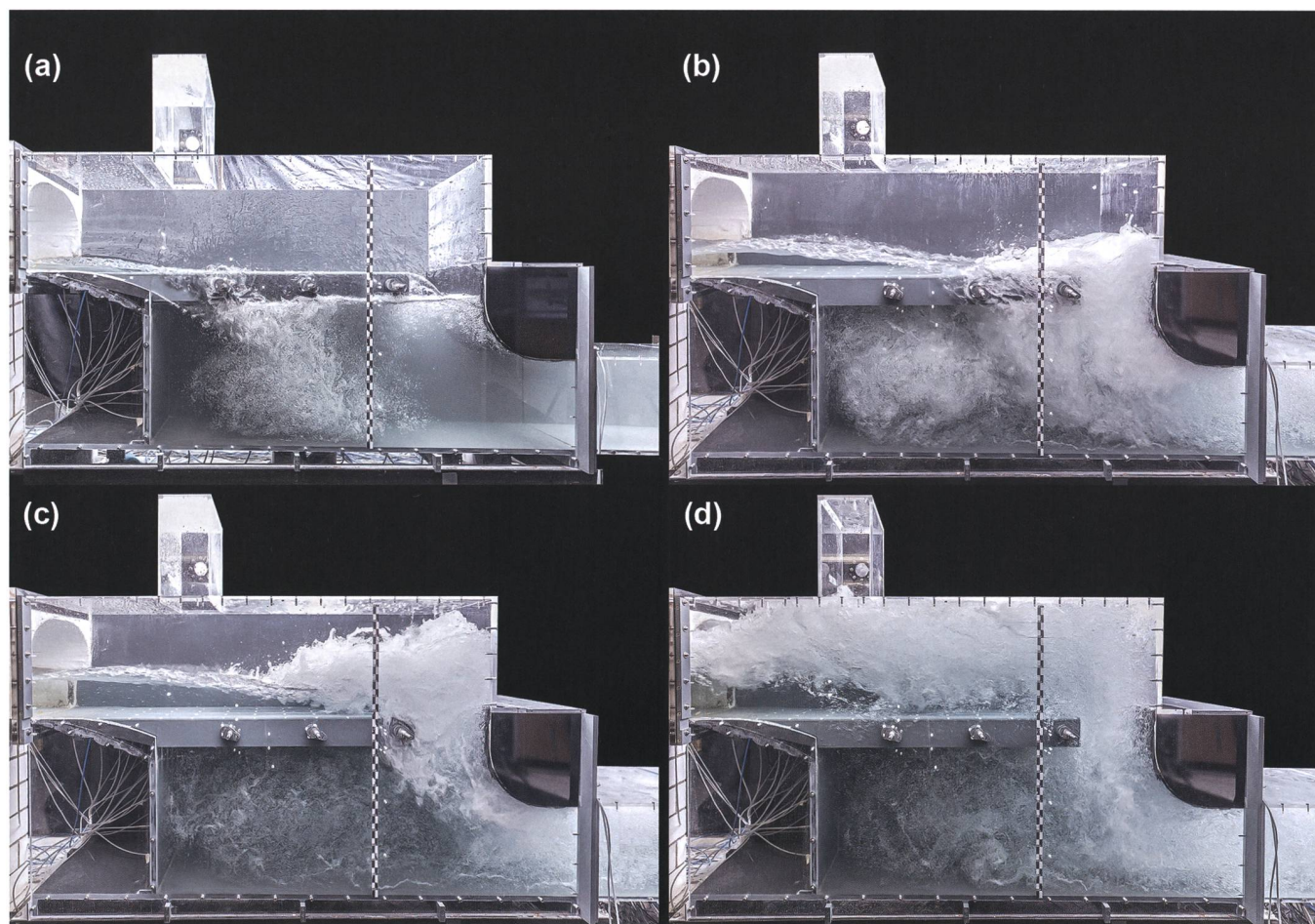


Bild 5: Strömungsstrukturen in der optimierten Toskammer für verschiedene Durchflüsse: a) $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$, b) $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, c) $Q_d = 330 \text{ m}^3/\text{s}$ und d) $Q_{\text{ÜLF}} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Strömungsbild ist a) vom Tauchstrahl und b) bis d) vom Oberflächenstrahl geprägt.

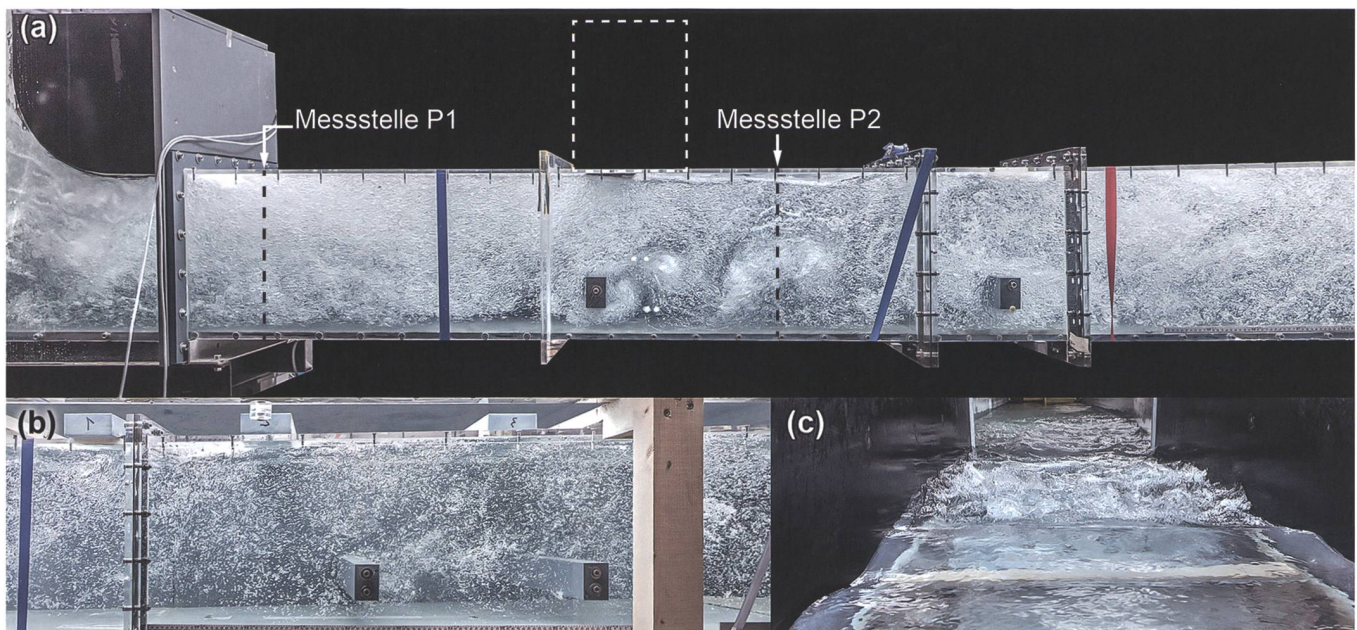


Bild 6: Strömungsstrukturen im ABW exemplarisch anhand des Dimensionierungsabflusses Q_d bei mittlerem Seespiegel $H_{S,m}=406,50$ m ü. M. a) im Rechteckkanal: dispergierte Blasenströmung und Wirbelstrasse im Bereich der ersten beiden Horizontalblenden, b) im Mündungsbauwerk, c) flächige Entgasung über Entlüftungsöffnungen in der Decke des Mündungsbauwerks, die zum Teil fontänenartig an der Wasseroberfläche entweichen.

ca. 4 m/s aus dem Mündungsbauwerk in den Zürichsee aus. Der austretende Strahl fächert über die Breite und bis zur Seesoberfläche auf, wo ab einer Entfernung von ca. 80 m die maximalen Geschwindigkeiten von 0,7 m/s–0,8 m/s auftreten (Bild 7). Die Fließgeschwindigkeiten in der Strahlachse sowie die seitlichen Zuströmgeschwindigkeiten zwischen 0,15 m/s und 0,2 m/s decken sich dabei gut mit den Werten des axialsymmetrischen Strahls (Blevins, 2003), obwohl sich ein Wandstrahl entlang des abfallenden Seegrunds ausbildet. Die Übereinstimmung kann auf die abfallende Sohle zurückgeführt werden, die die Aufächerung durch ein Strahlanhaften auch in vertikaler Richtung begünstigt (Hari, 1973). Die in der Theorie beschriebene Strahl-Kernzone bildet sich in den Versuchen nicht aus, da der durch die Wirbelstrukturen im Nachlauf der Horizontalblende begünstigte Strahlerfall unmittelbar nach dem Austritt in den Zürichsee einsetzt. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten treten im Nahbereich der Mündung oberhalb der Horizontalblenden in einer Tiefe von ca. 6,5 m (bezogen auf $H_{S,m}=406,50$ m ü. M.) auf und betragen das 1,6-Fache der mittleren Austrittsgeschwindigkeit v_m .

Bei den Versuchen am Schnittmodell und im Wellenbecken handelt es sich um Reinwasserversuche, d.h. Dichteunterschiede, wie sie z.B. durch resuspendiertes Seegrundsediment zu erwarten sind, wurden nicht berücksichtigt. Weiterführende Überlegungen zur Einschichtung des Strahls sind in Stucki (2021) nachzulesen.

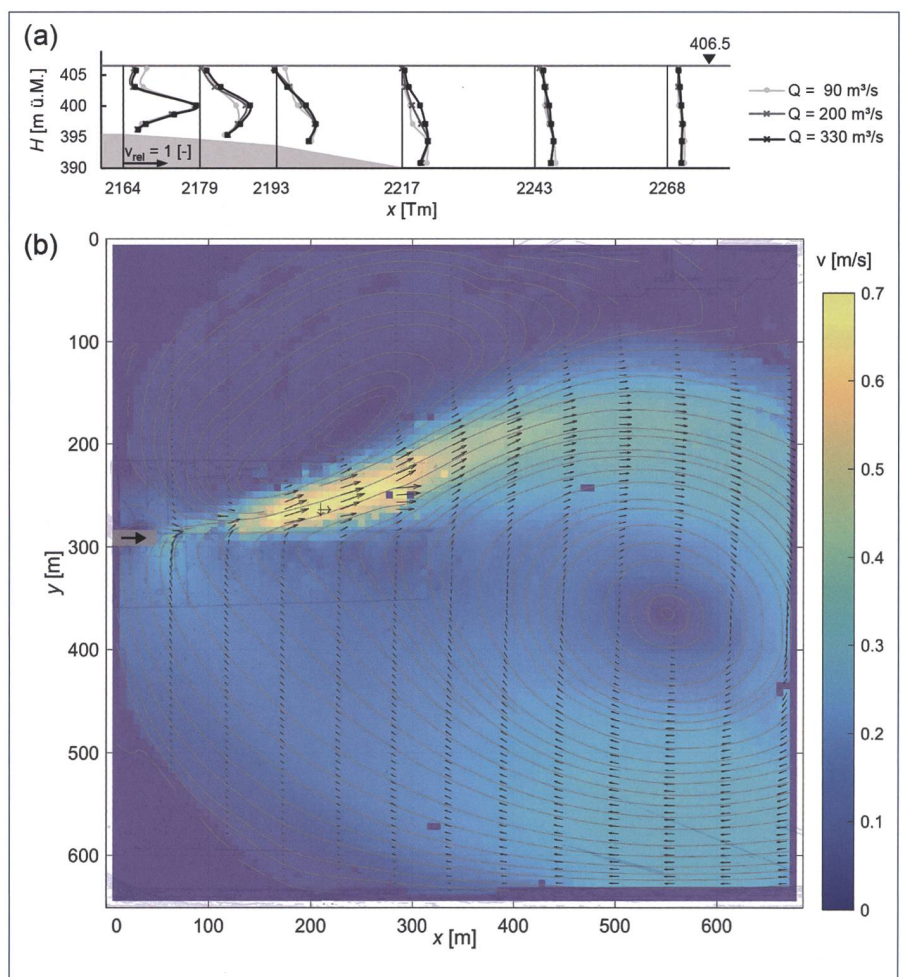


Bild 7: a) Längsprofil der relativen Fließgeschwindigkeiten $v_{rel}=v/v_m$ in der Fließachse für die Durchflüsse $90\text{ m}^3/\text{s}$, $200\text{ m}^3/\text{s}$ und $330\text{ m}^3/\text{s}$ in der nachgebildeten Seelamelle und b) Oberflächengeschwindigkeiten und Stromlinien im Seebecken der Abmessungen $645\text{ m} \times 1145\text{ m}$ für $330\text{ m}^3/\text{s}$ bei mittlerem Seespiegel $H_{S,m}=406,50$ m ü. M. Das Abdrehen des Strahls ist modellbedingt infolge Strahlaufprall am Wellenbeckenrand.

Luftströmung im Entlastungstollen und Zweiphasenströmung im Auslaufbauwerk

Die Quantifizierung des Luftbedarfs Q_a erfolgt über die Bilanzierung der über der Wasseroberfläche transportierten Luft im Entlastungstollen Thalwil $Q_{a,St}$ und des Luftaustrags aus dem Entlüftungsschacht der Toskammer $Q_{a,T}$. Der Vergleich der gemessenen Luftmenge im Stollen $Q_{a,St}$ mit Literaturwerten zeigt, dass die meisten Theorieansätze aufgrund unzureichender Übertragbarkeit zu hohe Werte für die optimierte Variante des ABW liefern. Der vereinfachte Ansatz von Wunderlich (1963) ergibt deutlich zu hohe Werte für $Q_{a,St}$, da Wunderlich in seinem Ansatz für die Berechnung des Luftbedarfs ein lineares Geschwindigkeitsprofil der Luftströmung annimmt. Die Messwerte des ABW-Modells liegen näher bei Werten für die mitgeführte Luftmenge in Steilleitungen mit 20 Prozent Neigung nach Volkart (1978).

Der Ansatz nach Rajaratnam (1962) liefert Werte des Lufteintrags Q_a in einen Wechselsprung, die mit den Messwerten im Rechteckkanal des physikalischen Modells der VAW sehr gut übereinstimmen. Der Berechnungsansatz ist abhängig von der Froudezahl in der «Vena Contracta» (hier F_c = Froudezahl beim Einlauf [Index 0] in die Toskammer, siehe Bild 3). Durch die Optimierung der Toskammer und insbesondere die Massnahmen zur Stützkrafteerhöhung im Rechteckkanal konnte die Luftkonzentration C_m im Rechteckkanal von 14 Prozent auf rund 3 bis 4 Prozent gesenkt werden.

Die Luftkonzentration C nimmt von der Sohle, wo sie für alle betrachteten Lastfälle nahezu null beträgt, über die Höhe bis zur Decke zu (Bild 8). Im Luftkonzentrationsprofil zeigt sich für alle Durchflüsse ein Knick, bis zu dem die Luft in Form dispergierter Blasen mit Konzentrationen von maximal 5 Prozent vorliegt. Oberhalb dieses Knicks (ca. bei $z/t > 0,8$ bis 0,85, mit t = lichte Höhe des Rechteckkanals, Bild 3) treten grössere Luftpolster auf, und die Luftkonzentration steigt an der Messstelle P2 in $x = 79,46$ m auf Werte von bis zu 50 Prozent an (für $Q > 200$ m³/s). Die Luftpolster konzentrieren sich infolge der Wirkung von Sekundärströmungen im mittleren Deckenbereich des Rechteckkanals, d.h. nahe seiner Symmetrieachse. Die Lage der Messstellen P1 und P2 bezieht sich auf den Koordinatennullpunkt an der Toskammerwand (Bild 6a).

Der Blasenanstieg ist im Modell verzerrt dargestellt, da die Luftblasengrößen in Modell und Prototyp nahezu identisch

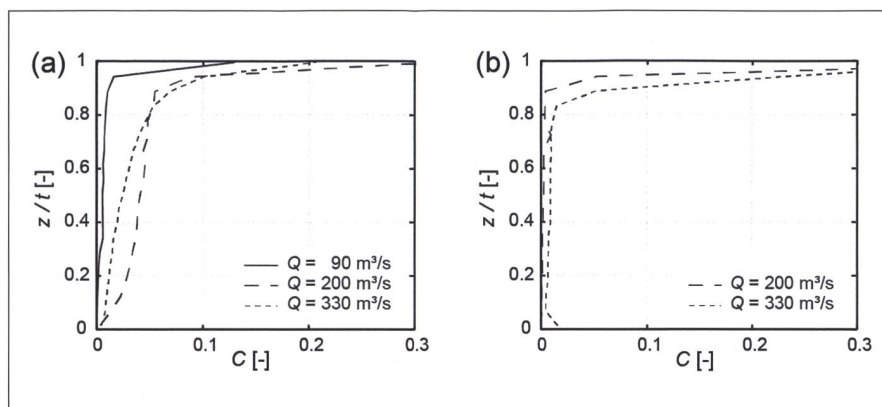


Bild 8: Luftkonzentration C über die Höhe des Rechteckkanals z/t an den Messstellen a) P_1 in $x=33,37$ m und b) P_2 in $x=79,46$ m für $Q=90$ m³/s, $Q=200$ m³/s und $Q=330$ m³/s bei Seespiegel $H_{s,m}=406,50$ m ü. M.

sind. Folglich ist der relative Geschwindigkeitsvektor u_b/v_w der Blasen im Modell und im Prototyp unterschiedlich (vgl. Bild 3). Im Prototyp werden demnach deutlich grössere Aufstiegslängen und geringere Luftkonzentrationen unter der Decke erwartet. Dementsprechend wird auch in Bezug auf die Entgasung im Zürichsee davon ausgegangen, dass mehr Luft in Form von Blasenströmung und weniger in Form von flächigen Aufpülzungen an der Seeoberfläche entweicht, als im Modell beobachtet.

Hydrodynamische Belastung

Entlang der Toskammersohle und an der rückseitigen Prallwand wurden die hydrodynamischen Drücke messtechnisch mit einer Aufnahme Frequenz von 200 Hz im Modell erfasst. Diese zeigen charakteristische Werte, wie sie in der Literatur für Strahlaufprall und Wechselsprung beschrieben werden (Toso et al., 1988; Irvine et al., 1997; Bollaert et al., 2002).

Der dimensionslose mittlere dynamische Druckkoeffizient C_p ist definiert mit $C_p = h_d / (v_o^2 / 2g)$ und beschreibt den prozentualen Anteil des kinetischen Energieeintrags $v_o^2 / 2g$, der bei Betrieb des Stollens auf die Sohle der Toskammer wirkt, wobei v_o der charakteristischen mittleren Fließgeschwindigkeit im Zulauf zur Toskammer entspricht (Bild 3). Dabei ist h_d die dynamische Druckhöhe als Differenz aus der mittleren gemessenen Druckhöhe h_m und der statischen Druckhöhe Y . Y wirkt auf die Sohle, wenn der Stollen nicht in Betrieb ist (Bild 3). Bild 9a zeigt C_p entlang der Toskammersohle für die untersuchten Durchflüsse von 90–400 m³/s bei Seespiegel $H_{s,m}$. Die Höchstwerte bei $x = 22$ m liegen etwa im Auftreffpunkt des Tauchstrahls auf die Toskammersohle. Die dortigen dynamischen Druckkoeffizienten nehmen im ÜLF Werte von 0,62 und im

Dimensionierungslastfall von 0,45 an. Für $Q=90$ m³/s liegt der Auftreffpunkt des Tauchstrahls im Bereich von $x=15$ m und erzeugt einen dynamischen Druckkoeffizienten von 0,04. Im Bereich der rückdrehenden Walze ist dagegen ein Druckabfall erkennbar.

Bild 9b) zeigt die dynamischen Druckschwankungsbeiwerte C_p für die Durchflüsse von 90 m³/s bis 400 m³/s im jeweiligen Bereich des Strahlaufpralls auf der Sohle. Diese sind gegen die relative Eintauchtiefe Y/h_o aufgetragen, mit h_o = charakteristische Fliesstiefe im Zulauf zur Toskammer (Bild 3). Die im Modell festgestellten Werte werden mit den Ergebnissen von Irvine et al. (1997) verglichen, die in einem Aufprallbecken bei senkrechter Strahleinleitung ermittelt wurden. Der Vergleich zeigt, dass die im ABW beobachteten dynamischen Druckschwankungen stets unter den in der Literatur gegebenen Werten liegen, letztere also als konservative Abschätzung zur Dimensionierung herangezogen werden können.

Die in der Toskammer erfassten Druckschwankungsspektren stammen von Turbulenzen und kohärenten Wirbelstrukturen. Im Bereich der Toskammersohle und der Absturzwand liegen die Grundfrequenzen f bei 0,2–0,3 Hz. In Analogie zur Theorie der Strahlausbreitung in einem Tosbecken entsprechen diese dominanten, tieffrequenten Schwankungen der Umlauffrequenz der grossräumigen Walze mit charakteristischem Längenmass d (vgl. Bild 3). Damit beträgt die Strouhal-Zahl $S = f \cdot d / v_o = 0,14$ (Armengou et al., 1991; Irvine et al., 1997). Die Amplituden dieser periodischen, tieffrequenten Druckschwankungen erreichen Maximalwerte von 1,4 m WS.

Die maximalen Druckschwankungsbeiwerte C' sind definiert mit $C' = h' / (v_o^2 / (2g))$, wobei h' die Druckschwankungshöhe beschreibt. Die C' -Werte betragen im Be-

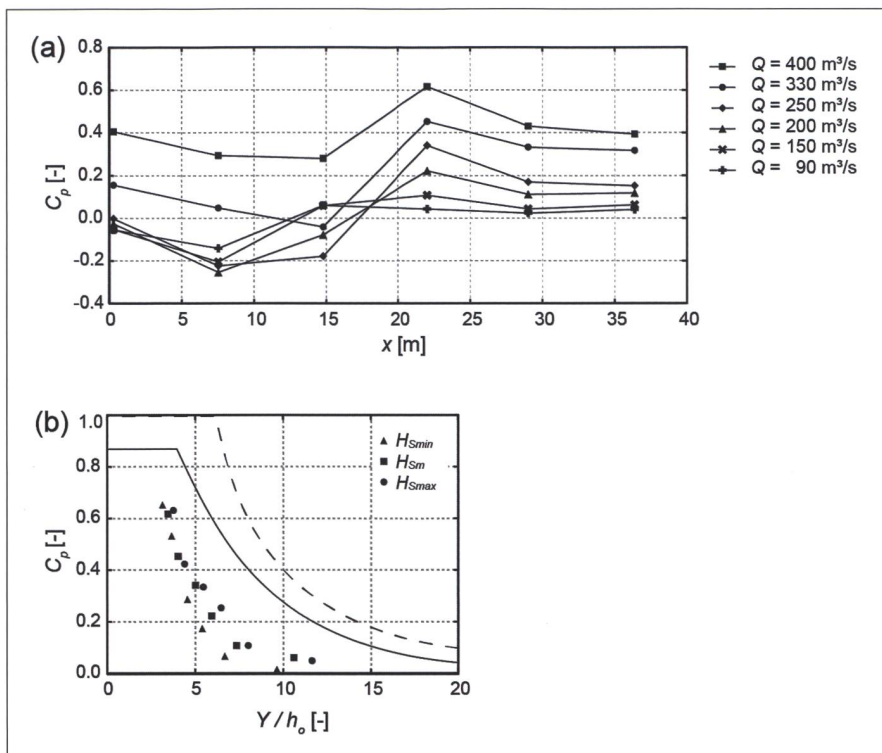


Bild 9: Dynamische Druckschwankungsbeiwerte C_p für das Durchflussspektrum von 90 m³/s bis 400 m³/s a) an ausgewählten Messstellen entlang der Toskammer-sole bei Seestand $H_{s,m}$ und b) im Bereich des Strahlaufpralls aufgetragen gegen die relative Eintauchstärke Y/h_0 für die Seestände $H_{s,min}$, $H_{s,m}$ und $H_{s,max}$ verglichen mit dem Aufprall eines Kreisstrahls nach Ervine et al. (1997) (—) nach experimentellen Ergebnissen und (---) theoretisch.

messungslastfall an der Prallwand 17 Prozent. An dieser Stelle sei auf Ervine et al. (1997) und Bollaert et al. (2002) verwiesen, die je nach Überdeckung maximale C_p -Werte von 17 resp. 33 Prozent angeben. Im Leistungsspektrum liegt die Spitze der spektralen Dichte bei 0,2 Hz.

An den Querträgern des Balkenrosts wird einsetzende Kavitation erwartet, weshalb eine Panzerung der Querträger sowie der Balken im Bereich der Auflager empfohlen wird.

Schwemmholzdurchleitung

Da im physikalischen Modell zum EBW trotz Rückhaltmassnahmen in der Sihl ein Eintrag von Schwemmholz in den Entlastungstollen beobachtet wurde (Wyss et al., 2021, in diesem Heft), musste das ABW derart optimiert werden, dass es zusätzlich zu den eingangs genannten Anforderungen eine sichere Schwemmholzdurchleitung garantiert und es durch Verklausungen nicht zu Funktionalitätseinbussen kommt.

Im Modell des ABW wurde die in den Modellversuchen zum EBW ermittelte Schwemmholzmenge von 54 m³ Lockervolumen in den aufgefundenen Schwemmholzklassen kontinuierlich zur Zulaufströmung zugegeben. Im Nachgang zu den Schwemmholzversuchen wurden die dabei entstandenen Verklausungen im Bauwerk belassen und dieses mit dem Dimensionierungsabfluss belastet, um den Aufstau infolge dieser Verklausung zu ermitteln. Vereinzelt wurden Verklausungen am Balkenrost der Toskammer beobachtet (Bild 10), dies insbesondere bei kleineren Stollendurchflüssen und damit geringerer Abflusstiefe im Zulauf. Die Verklausungen erfolgten dabei vermehrt am zweiten Querträger, da dieser auf Höhe der oberen Trajektorie des abtauchenden Strahls liegt. Der Aufstau führte in keinem der untersuchten Lastfälle zu Funktionalitätseinbussen des ABW beim danach gefahrenen Dimensionierungsabfluss, macht jedoch nach einem Hochwasserereignis Aufräumarbeiten am Balkenrost der Toskammer erforderlich.

An den Horizontalblenden in Rechteckkanal und Mündungsbauwerk wurde kein über den Versuch andauerndes Anhängen von Schwemmholz dokumentiert. Andockende Stämme werden jeweils nach kurzer Zeit durch die Strömungskraft weitertransportiert (Rotationsbewegung des Stammes um die Blende). Die Anordnung im unteren Drittel des Querschnitts, die zur Unter- und Überströmung der Blenden führt, ist damit verklausungstechnisch günstig. Im Vergleich zu anderen im Variantenstudium untersuchten Varianten zur Erhöhung der Stützkkräfte wie bspw. einem Vertikalrechen oder Sohlswellen weisen die Horizontalblenden ein sehr gutmütiges Verhalten in Bezug auf die Schwemmholzdurchleitung auf.

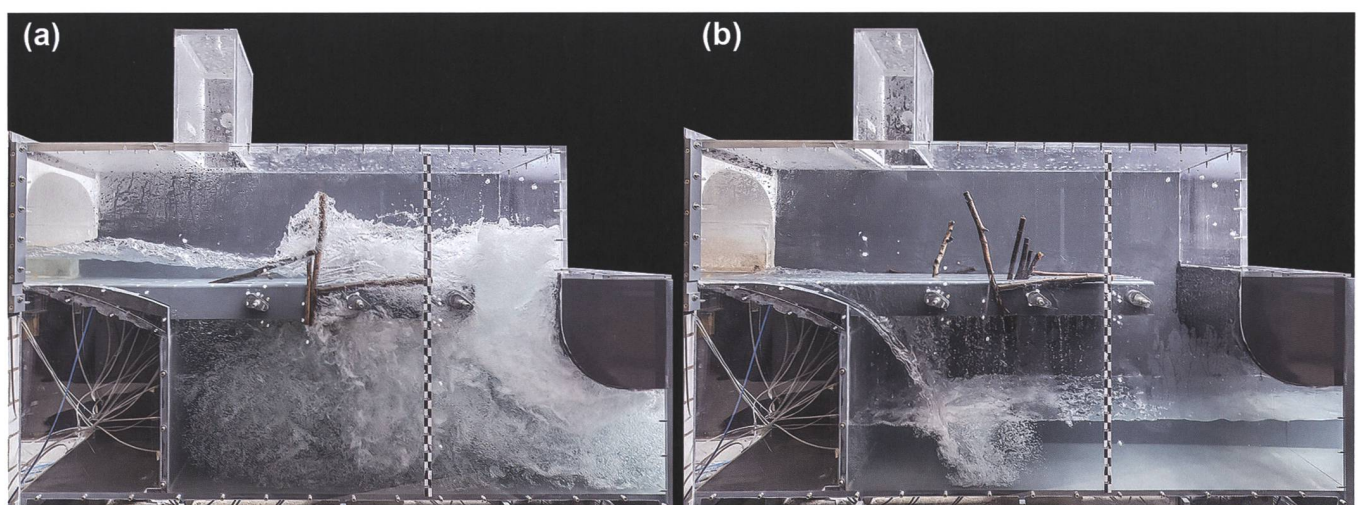


Bild 10: Verklausungen an den Querträgern des Balkenrosts a) im laufenden Versuch mit 200 m³/s und minimalem Seespiegel $H_{s,min} = 405,50$ m ü. M. und b) nach Versuchsende.

Zusätzlich zu den Versuchen mit der erwarteten, maximalen Schwemmh Holzmenge wurden systematische Schwemmh Holzversuche mit Einzelholzzugabe (30 St.) verschiedener Ast- und Stammklassen durchgeführt (Bild 10). Die Versuche dienten der Dokumentation und dem Aufzeigen neuralgischer Stellen für Schwemmh Holzverklausungen sowie der sich dabei einstellenden Strömungsprozesse. Sie zeigten, dass Schwemmh Holz in der Toskammer vor allem bei Abflüssen kleiner dem Dimensionierungsabfluss und bei tiefem Seespiegel verklaust. Der Rückhalt beträgt dabei 25 bis 30 Prozent. Beim Dimensionierungsabfluss wird sämtliches Holz in den Zürichsee durchgeleitet. Auch bei den systematischen Schwemmh Holzversuchen hängen vor allem grosse und mittlere Stämme an den Querauflägern der Längsbalken in der Toskammer an oder verkeilen zwischen den Längsträgern. Bereits verkeilte Hölzer erhöhen die Verklausungswahrscheinlichkeit nachträglich eingetragener Hölzer im Modellversuch, so dass es zur Akkumulation mehrerer grosser und mittlerer Hölzer kommt (im Prototyp wird eher erwartet, dass die Stämme unter der Einwirkung der Strömungskräfte brechen). Entlang dieser verkeilten Hölzer erhöht sich durch die Bildung freier Scherflächen der Lufteintrag lokal. Das kleine

Astholz wird hingegen ausnahmslos durch die Toskammer geleitet. Der Transport der Schwemmhölzer in den Rechteckkanal erfolgt sowohl dem Tauchstrahl folgend zwischen den Längsbalken hindurch als auch aus dem Wechselsprung hinaus über den freien Querschnitt im hinteren Bereich der Toskammer. Bei diesen Prozessen kann teilweise ein Einfluss der Dichte festgestellt werden. Dichte Hölzer tauchen eher mit dem Tauchstrahl ab, während leichtere Hölzer eher dem Oberflächenstrahl in den Wechselsprung folgen. Zudem können bei kleinen Durchflüssen Hölzer geringer Dichte unter der Decke des Rechteckkanals anhaften. Bei steigendem Durchfluss werden diese jedoch weitertransportiert.

Fazit und Empfehlungen

Mithilfe eines grossskaligen physikalischen Modellversuchs konnte das ABW des Entlastungsstollens Thalwil hydraulisch optimiert werden. Dabei wurde mithilfe von Einbauten in Toskammer und Rechteckkanal die Energiedissipation innerhalb der Toskammer sichergestellt und der Lufttransport im Rechteckkanal von 16 auf 3 bis 4 Prozent minimiert. Das Testen verschiedener Varianten im Modellversuch zeigte ein äusserst sensitives Systemverhalten bezüglich diverser Einbauten im

Bauwerk und der Wasserspiegellage des Zürichsees. Die Optimierungsmassnahmen wurden so abgestimmt, dass allfällig anfallendes Schwemmh Holz sicher durch das ABW geleitet wird und das Bauwerk nicht durch Verklausungen versagt.

Jedoch zeigen die Versuche, dass trotz intensiver Optimierungsmassnahmen der Lufteintrag in den Rechteckstollen nicht gänzlich unterbunden werden kann. Die eingetragene Luft wird in den Zürichsee weitergeleitet und führt bei der Mündung in einer Entfernung von etwa 90 m zum Ufer zu flächigem Luftaustrag in Form von Aufpülzungen und vermindertem Auftrieb infolge Blasenströmung.

Aufgrund der komplexen Strömungsprozesse und der verschiedenen involvierten Medien – Wasser, Luft, Schwemmh Holz – war zur Optimierung des Bauwerks ein physikalischer Modellversuch nötig und wird auch für ähnliche Problemstellungen empfohlen.

Dank

Die Autorenschaft bedankt sich bei allen Beteiligten für die hervorragende Zusammenarbeit.

Quellen:

Arch, A., Mayr, D. (2006): De-aeration of air-water flows in the tailwater channels of Pelton turbines. *International Journal on Hydropower and Dams*, 13(2), 106
Armengou, J. & Ervine, D. A. (1991): Mean and fluctuating pressure field in full-width free-nappe stilling basins. *Proceedings of 24 IAHR Congress Madrid*, D: 263–269
Blevins, R.D. (2003): *Applied fluid dynamics handbook*. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1984, 568 p.
Bollaert, E., Falvey, H.T., Schleiss, A. (2002): Assessment of turbulent jet impingement on rocky riverbeds: the particular properties of a near-prototype physical model study. *River Flow 2002 – Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, pp. 395–403
Ervine, D.A., Falvey, H.T. (1987): Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 83(1), 295–314
Ervine, D.A., Falvey, H.T., Withers, W. (1997): Pressure fluctuations on plunge pool floors. *Journal of Hydraulic Research*, 35(2), 257–279

Hager, W.H. (1995): Aufprallbecken. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 47(5-6), 91–101
Hari, V.M. (1973): Plane Jet on Sloping Floors under Finite Submergence. *Journal of the Hydraulics Division*, 99(9), 1449–1460
Kramer, K., Hager, W. H. (2005): Air transport in chute flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 31(10–11), 1181–1197
Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K. (1974): A flow map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1(4), 537–553
Rajaratnam, N. (1962): An Experimental Study of Air Entrainment Characteristics of the Hydraulic Jump. *Journal of the Institution of Engineers of India*, 42(7), 247–273
Stucki, A. (2021): Entlastungsstollen Thalwil – Stand und Ausblick, *Wasser Energie Luft*, 113(3), 153–162
Toso, J.W., Bowers, C.E. (1988): Extreme Pressures in Hydraulic-Jump Stilling Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 829–843
Volkart, P. (1978): *Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme*. VAW-Mitteilung Nr. 30, Versuchsanstalt

für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, D. Vischer, ed., ETH Zürich
Wunderlich, W. (1963): Die Grundablässe an Talsperren, Teil 2. *Wasserwirtschaft*, 53(4), 106–114
Wyss, A., Billeter, P., Boes, R., Hinkelammert-Zens, F., Müller, M., Stucki, A., Weitbrecht, V. (2021): Entlastungsstollen Thalwil – Physikalische Modellversuche zum Einlaufbauwerk, *Wasser Energie Luft*, 113(4), 205–211

Autoren:

Alice Schroeder, Prof. Dr. Robert Boes, Adriano Lais
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH Zürich, Höggerberggring 26, CH-8093 Zürich, schroeder@vaw.baug.ethz.ch
Dr. Peter Billeter, Yves Keller, IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, CH-3000 Bern
Adrian Stucki, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich, Baudirektion, Walcheplatz 2, CH-8090 Zürich