

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Schroeder, Alice; Lais, Adriano

Hochwasserschutz für Zürich - Auslaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106550>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schroeder, Alice; Lais, Adriano (2019): Hochwasserschutz für Zürich - Auslaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): 21. Treffen junger WissenschaftlerInnen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 19-26.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Hochwasserschutz für Zürich - Auslaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil

Alice Schroeder, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich

Adriano Lais, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich

Einleitung

Aufgrund der Lage der Stadt Zürich im Schwemmkegel des Flusses Sihl und dem entsprechend sehr großen Schadenspotential bei einer Überschwemmung der stark besiedelten Flächen wurde das Gesamtprojekt *Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat* vom Kanton Zürich initiiert (AWEL 2017). Der *Entlastungsstollen Thalwil* stellt eine der Maßnahmen zum langfristigen Hochwasserschutz der Stadt Zürich dar (Bild 1).

Die Hochwasserspitzen werden der Sihl auf der Außenseite einer Linkskurve im oberen Sihltal entnommen (Bild 1, links) und durch einen etwa 2 km langen Entlastungsstollen mit einem Innendurchmesser von 6.60 m dem Zürichsee zugeleitet. Die Entnahme erfolgt reguliert durch ein Schlauchwehr, wodurch die Sihl in der Restwasserstrecke unterhalb der Entnahmestelle trotz der Maßnahme noch eine ausreichende Hochwasserdynamik erfährt. Der Stollen wird im Freispiegelabfluss-Regime betrieben und mündet in Thalwil mit Zulaufgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s in das unterirdisch gelegene Auslaufbauwerk (ABW, Bild 1, rechts).

Die Dimensionierung ist auf ein Sihlhochwasser von 600 m³/s ausgelegt, was einem 500-jährlichen Ereignis entspricht. Die Trenncharakteristik sieht die Entlastung von 330 m³/s in den Zürichsee und die Weiterleitung von 270 m³/s in der Sihl in Richtung der Stadt Zürich vor. Der Anspringpunkt des Entlastungsstollens liegt bei Ereignissen von voraussichtlich > HQ₂₀.

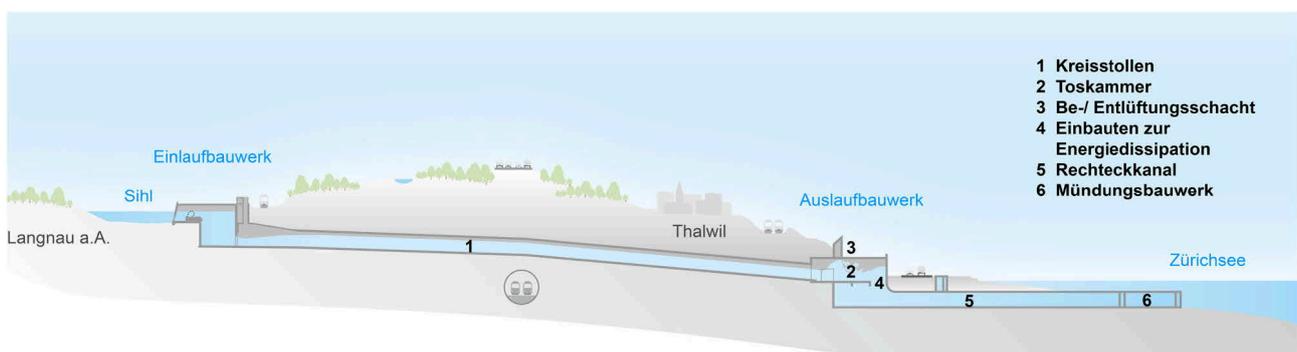


Bild 1: Längsschnitt durch den Entlastungsstollen Thalwil mit Einlaufbauwerk (links), Kreisstollen (Mitte) und ABW mit Toskammer, Rechteckkanal und Mündungsbauwerk in den Zürichsee (rechts). (Grafik: AWEL, 2019, bearbeitet: VAW)

Das Kernstück des ABW bildet eine 23 m lange Toskammer, die die Abflüsse entschleunigen und eine Energieumwandlung von etwa 50 MW im Dimensionierungslastfall bewältigen soll. An die Toskammer schließt ein 135 m langer, 6.2 m hoher und 8 m breiter Rechteckkanal an, der unter Druck betrieben wird und die Abflussspitzen einem Mündungsbauwerk zuführt. In der Mündungstropfete wird der Querschnitt auf einer Länge von 22.5 m bis auf eine Breite von 13 m aufgeweitet und infolgedessen der Ausfluss in den Zürichsee auf moderate Geschwindigkeiten von maximal 4 m/s abgebremst. Die Mündungstropfete ist mit 3.8 m unter dem mittleren Seewasserstand überstaut und liegt etwa 90 m vom Seeufer entfernt.

Das ABW stellt ein zentrales Bauwerk des Entlastungstollens dar, dessen Funktionstüchtigkeit maßgebend für das Funktionieren des Gesamtsystems ist. Aufgrund der begrenzten innerörtlichen Platzverhältnisse kann die Toskammer nicht ausreichend lang geplant werden, dass sich ein Wechselsprung rechnerisch selbstständig in der Kammer einstellen könnte. Die eigentliche Herausforderung ist, dass sich der Wechselsprung über dem Niveau des Seespiegels einzustellen hat, um die Ausleitung des Hochwasserabflusses im anschließenden Rechteckkanal unter Vollfüllung sicherzustellen. Die Toskammer muss daher mit Einbauten ausgestattet werden, sodass der Wechselsprung nicht aus der Kammer geblasen wird.

Vorstudien zeigen, dass die Energieumwandlung innerhalb des verfügbaren Platzes, die Wasser-Luft-Austauschprozesse in der Toskammer, die Entmischungsprozesse im anschließenden Rechteckkanal sowie die Abströmung in das Seebecken nach dem Mündungsbauwerk zwingend eines großskaligen physikalischen Modellversuchs bedürfen.

Versuchsaufbau

Zu diesem Zweck wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich ein physikalisches Modell nach Froude'scher Ähnlichkeit im Maßstab 1:16.92 errichtet (Bild 2). Das Modell umfasst die letzten 100 m des 3.32% geneigten Kreisbollens ④, den Profilverzug von Kreis- auf Torbogenprofil ⑤, die Toskammer ⑥ mit Be-/ Entlüftungsschacht ⑥^e sowie mit veränderbaren Einbauten zur Energiedissipation, den Rechteckkanal ⑦, das Mündungsbauwerk in Form einer Aufweitung ⑩ und das Seebecken des Zürichsees ⑮ auf einer Länge von ca. 135 m.

Das Modell verfügt über ein automatisiertes Messsystem im Bereich des Seebeckens, sodass Wasserspiegellagen mittels Stechpegel und Ultraschallsensoren und Austrittsgeschwindigkeiten in den See mittels Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) erfasst werden können. Zudem ist das Modell mit Sensoren zur Erfassung der hydrodynamischen Drücke, mit Hitzedraht-Anemometern zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeiten in den Belüftungsschächten sowie mit weiterer Messtechnik wie faseroptischer Sonde und Ultrasound Velocity Profile (UVP) ausgestattet.

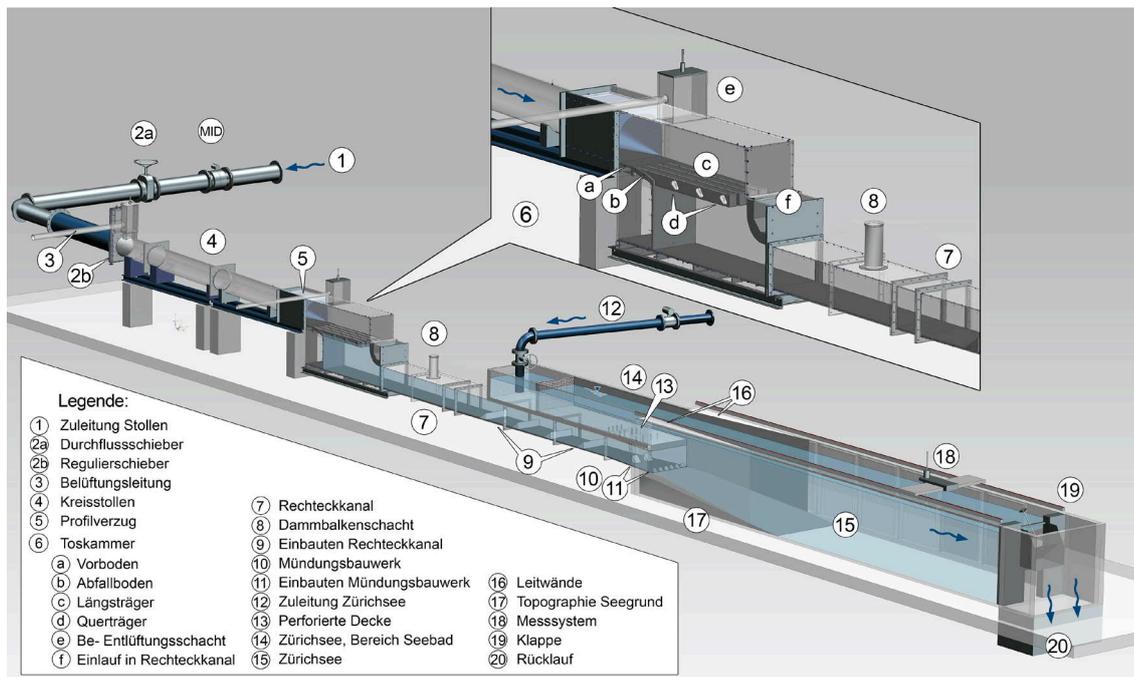


Bild 2: Isometrische Darstellung des physikalischen Modells des ABW im Maßstab 1:16.92.

Untersuchung

Gegenstand der Untersuchung ist die hydraulische Optimierung des ABW mit dem Ziel, den Wechselluftsprung in der Toskammer zu stabilisieren und den Luftereintrag in den Rechteckkanal resp. - austrag in den Zürichsee gering zu halten.

Um diese kontroversen Ziele zu erreichen, werden zunächst die Toskammer und später der Rechteckkanal diversen Optimierungsschritten unterzogen, um die Einflüsse einzelner Einbaukomponenten zu ermitteln. Im Variantenstudium werden zunächst nur hydrodynamische Druckhöhen und Luftgeschwindigkeiten zur Ermittlung des Luftbedarfs messtechnisch erfasst. Dabei wird jeweils ein Abflussspektrum vom Ansprungpunkt bis zum Dimensionierungsabfluss HQ_{500} bei verschiedenen Unterwasserspiegeln im See betrachtet.

Die erste Einbausituation bildet die Variante *Grundlösung* (Bild 3, links). Diese umfasst einen abrupten Profilübergang von Kreis- auf Rechteckprofil beim Übergang des Stollens in die Toskammer. Als Einbauten in der Toskammer werden ein Überfall und ein dahinterliegender Balkenrost aus vier in Längsrichtung ausgerichteten Balken mit prismatischem Querschnitt und zwei rechteckigen Querauflagern eingesetzt. Die durch den Stollen in die Toskammer eingetragene Luft kann durch einen Be- und Entlüftungsschacht in der Toskammer entweichen. Dieser Schacht dient ebenfalls zur Belüftung des Wechselluftsprungs.

Die dem Abfluss in der Toskammer beigemischte Luft wird im System weiter bis in den Zürichsee transportiert, da aus diversen Gründen eine Entlüftung des Rechteckkanals nicht ausführbar ist. Aus diesem Grund soll der Luftereintrag in das System minimiert werden.

Resultate und Diskussion

Aufbauend auf der Variante *Grundlösung*, die im Variantenstudium vielversprechendere Ergebnisse als die anderen untersuchten Varianten in Bezug auf Energiedissipation und minimierten Lufteintrag erzielt, wird die Toskammeroptimierung durchgeführt. Dabei wird der Einfluss verschiedener Elemente auf Energieumwandlung und Lufteintrag untersucht, wobei jeweils nur ein Element verändert wird. Die Optimierungsschritte sollen hier nicht im Detail erläutert werden. Lediglich die erfolgreichen Maßnahmen und die daraus gezogenen Schlüsse werden angegeben, um das Ergebnis einer optimierten Toskammer schlüssig aufzeigen zu können (Geometrie: Bild 3, rechts; Strömungsstrukturen der optimierten Toskammer: Bild 4).

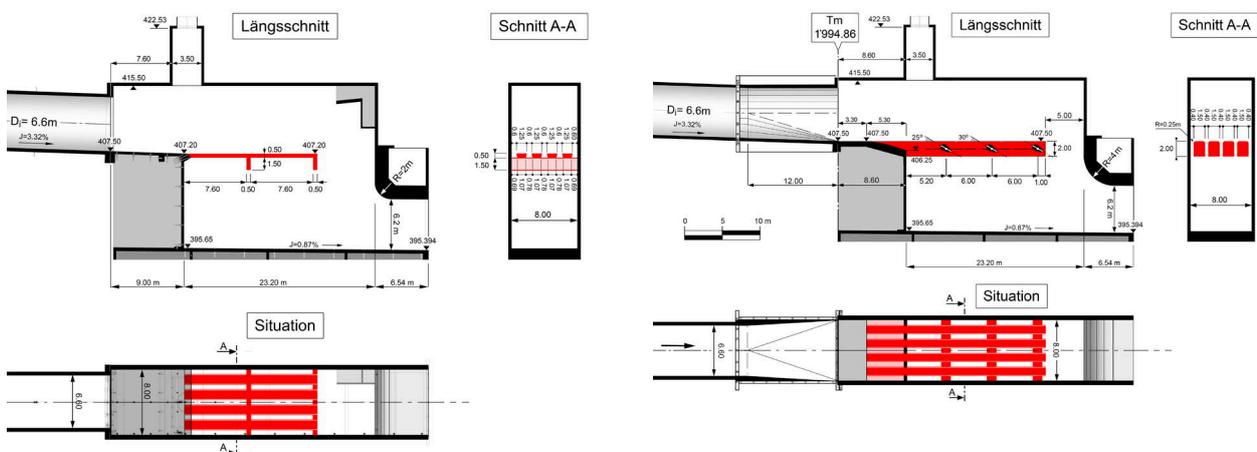


Bild 3: Einbauten in der Toskammer für die Variante Grundlösung (links) und die optimierte Toskammer (rechts)

Beim Übergang des Kreisstollens zur Toskammer wird ein Profilverzug angeordnet, um seitliche Stoßwellen ③ zu verringern, die eine Eintragsquelle für Luft darstellen (die Nummerierung bezieht sich auf Bild 4).

Durch den Abfallboden wird eine Strahltrennung angestrebt, bei der der Oberflächenstrahl ④ über die Längsbalken dem Wechselsprung ⑦ zugeführt und ein Tauchstrahl ② luftfrei in die Tiefe geleitet wird. So wird einem Durchschießen des Strahls in den Rechteckkanal entgegengewirkt.

Die Untersuchung verschiedener Abfallböden beim Einlauf der Toskammer zeigt die besten Resultate für einen erhöhten Boden, der zum Ende hin der Strahltrajektorie für 200 m³/s folgt.

Bei der Gestaltung der Längsbalken wird von der prismatischen Form abgesehen, da die Ablösung der Strömung an den scharfkantigen Profilen den Lufteintrag fördert. Stattdessen werden die Kanten gebrochen und abgerundete Längsbalken eingesetzt, sodass die ablösefreie Umströmung der Längsbalken die Luftbeimischung in den abtauchenden Strahl ② verhindert.

Die Balkenbreiten werden daraufhin ausgelegt, den Impulsfluss zwischen den Balken moderat zu halten, um einer Wasserspiegelsenkung in der Kammer entgegen zu wirken. Zudem wird die Balkenhöhe vergrößert und die Balkenunterkante auf die Kote des minimalen Seespiegels gesetzt. Mit diesen beiden Maßnahmen wird ein belüfteter Bereich unter den Balken verhindert, der eine Beimischung von Luft über die raue Oberfläche des eintauchenden Strahls ② in den Wasserkörper ermöglicht hätte.

Die Balken überspannen wie in der *Grundlösung* nicht die Gesamtlänge der Toskammer. Der Freiraum im hinteren Bereich der Kammer wirkt der Trennung des Kontinuums resp. der Trennung zwischen

dem Wechselsprung ⑦ und dem Tauchstrahl ② im hinteren Teil der Toskammer entgegen, da die Last des Wechselsprungs nicht über die Längsbalken abgetragen werden kann, sondern auf das Wasser-Luft-Gemisch wirkt. Auch damit wird das Konzept verfolgt, möglichst keine Lufträume zu schaffen.

Der Balkenrost wird durch drei strömungsgünstig geformte Querträger gehalten, die optimal zur Strahltrajektorie des abtauchenden Strahls ausgerichtet sind.

Der dem Wechselsprung zugeführte Teilabfluss mischt viel Luft ein, von der jedoch ein großer Teil wieder aus der Deckwalze entgasen kann.

Den größten Einfluss auf die optimale Funktionalität der Toskammer hat jedoch der Gegendruck aus dem Zürichsee. Bei niedrigem Seestand bildet sich eine Schichtströmung im Rechteckkanal mit in der Folge sehr großem Lufteintrag. Bei maximalem Seespiegel sind die Ergebnisse des Lufteintrags in das System deutlich niedriger als bei minimalem Seespiegel – dies gilt für alle untersuchten Optimierungsschritte. Aus diesem Grund werden im Rechteckkanal durch Einbauten zusätzliche Verluste erzeugt, um die Drucklinie in der Toskammer anzuheben resp. den Einstau der Balkenträger sicher zu stellen.

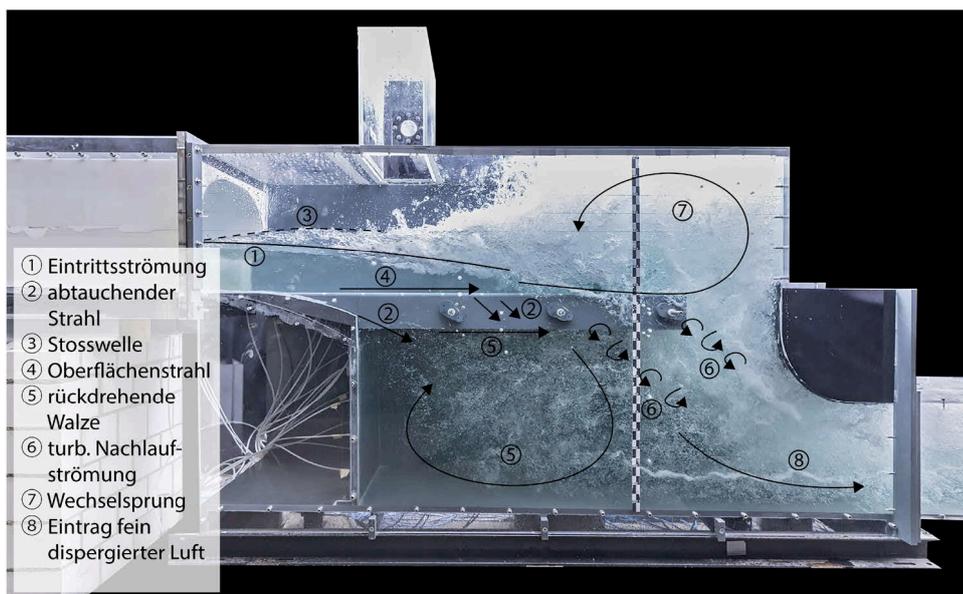


Bild 4: Strömungsstrukturen in der optimierten Toskammer für den Dimensionierungsabfluss HQ₅₀₀ bei mittlerem Zürichseestand.

Im Mündungsbauwerk sowie im gesamten Rechteckkanal herrscht Druckabfluss. Dennoch bildet sich in der Aufweitung des Mündungsbauwerks der Grundlösung durch die große Luftmenge im System ein Wechselsprung (Bild 5, links). Durch die große unter der Decke angesammelte Luftmenge im Rechteckkanal ist die Haftbedingung in diesem Bereich nicht erfüllt. Infolgedessen können sich keine Schubspannungen zur Herbeiführung einer verzögerten Bewegung aufbauen und es kommt zu schießendem Abfluss und einem Wechselsprung mit Deckwalze. Die große unter der Decke mitgeführte Luftmenge im Rechteckkanal (elongierte Blasenströmung) verhindert den Aufbau von Schubspannungen, da die Strömung von der Decke ablöst. Infolgedessen kann in der Aufweitung eine verzögerte Bewegung nicht herbeigeführt werden. Der Wasserspiegel senkt sich im sich öffnenden Querschnitt, es kommt zu schießendem Abfluss und einem Wechselsprung mit Deckwalze. Dieser Wechselsprung bewirkt eine höhere Belastung des Mündungsbauwerks durch größere

Druckschwankungen sowie eine höhere Belastung der Seesohle, die zu Trübungen und damit einer Beeinträchtigung der nahe gelegenen Trinkwasserfassungen führen kann. Aus diesem Grund wird in diesem Bereich im Rahmen der Optimierung des Bauwerkes eine Perforation der Decke angeordnet, die in Kombination mit Einbauten im Mündungsbauwerk zu einer flächigen Entgasung der unter der Decke angesammelten Luft und damit einer Verhinderung des Wechselsprungs führt.



Bild 5: Wechselsprung in der Aufweitung des Mündungsbauwerks (links) für Dimensionierungsabfluss und mittleren Seespiegel. Im System herrscht Druckabfluss. Als Maßnahme werden Einbauten in Kombination mit einer Perforation der Decke angeordnet, um den Wechselsprung zu verhindern. Die Luft entgast in Form von Aufwölbungen über die perforierte Decke (rechts).

Die in die Toskammer eingetragene Luft entgast vollständig in den Zürichsee. Die unter der Decke angesammelte Luft wird über die Perforation der Decke des Mündungsbauwerks flächig in Form von Aufwölbungen abgeführt (Bild 5, rechts). Die Aufwölbungen erreichen Höhen von etwa 6 m, was Wellen mit Wellenhöhen von max. 0.5 m induziert. Die Wellenhöhen sind damit kleiner als in diesem Bereich typische Windwellen. Die über die Tiefe in Form dispergierter Blasen eingemischte Luft entgast als Blasenströmung in den Zürichsee und steigt erst im Zürichsee hinter der Mündung vollständig an die Oberfläche auf.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche zur Grundlösung und zur Optimierung der Toskammer sind abgeschlossen und haben gezeigt, dass das System die höchste Funktionalität 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. Damit können die beiden kontroversen Anforderungen der erfolgreichen Energiedissipation und der Reduzierung des Lufteintrags in das ABW erreicht werden.

Durch die Optimierungsmaßnahmen in der Toskammer und die Anhebung der Drucklinie durch Einbauten im Rechteckkanal konnte der Luftbedarf des Auslaufbauwerks im Vergleich zur Grundvariante stark reduziert werden. Der maximale Lufteintragskoeffizient β für den Optimierungsstand bei HQ_{500} und mittlerem Seestand beträgt 3%. Im Vergleich dazu liegt der Luftbedarf β für die Grundvariante bei 11%.

Derzeit wird an der Optimierung des Rechteckkanals mit Einbauten zur Anhebung der Drucklinie geforscht. Die Anforderungen an diese Einbauten sind hoch, da zum einen die Durchleitung von Schwemmholz sichergestellt werden muss. So kann nicht auf den Einbau eines Rechens zurückgegriffen werden, da hier Schwemmholz verklaust und zu Funktionalitätseinbußen der Toskammer führt. Auch die Tatsache, dass ein *EHQ* schadlos abgeführt werden muss, stellt eine

weitere Randbedingung an den Rückstau aus dem Rechteckkanal dar. Folglich muss die Toskammer noch ausreichende Reserven für eine zusätzliche Wassermenge von 70 m³/s zum Dimensionierungsabfluss ausweisen – auch bei maximalem Seespiegel.

Zum anderen stellt die, trotz der in der Toskammer getroffenen Maßnahmen, immer noch große Luftmenge eine Herausforderung dar, da sie im unter Druckabfluss betriebenen Rechteckkanal zu Strömungsbildern wie gewellter Schichtströmung oder Luftansammlungen mit nachfolgendem Wechselsprung führen kann. Der Rechteckkanal und das Mündungsbauwerk haben folglich nicht nur die Funktion des Durchleitens des Stollenabflusses, sondern leisten auch einen Teil der Energieumwandlung.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird derzeit ein Konzept für die Ausführungsplanung entwickelt.

Literatur

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Baudirektion, Kanton Zürich (2017):

Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat, Gefährdung und Massnahmen im Überblick, Zürich: Baudirektion, Kanton Zürich. Online verfügbar:

https://awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/wasser/hochwasserschutz/hochwasserschutz_zuerich.html, zuletzt geprüft am 20.05.2019.

