

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Wyss, Andris; Müller, Michael; Boes, Robert; Hinkelammert-Zens, Florian; Billeter, Peter; Adrian Stucki; Weitbrecht, Volker**

## **Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat - Einlaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil**

VAW Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

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

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108421>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Wyss, Andris; Müller, Michael; Boes, Robert; Hinkelammert-Zens, Florian; Billeter, Peter; Adrian Stucki; Weitbrecht, Volker (2021): Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat - Einlaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil. In: Boes, Robert (Hg.): Wasserbau-Symposium 2021. Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel. Band 2. VAW Mitteilungen 263. Zürich: ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. S. 333-341.

### **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.

Verwertungsrechte: CC BY 4.0



# Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat - Einlaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil

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

**Andris Wyss, Michael Müller, Robert Boes, Florian Hinkelammert-Zens,  
Peter Billeter, Adrian Stucki, Volker Weitbrecht**

## **Kurzfassung**

Das Einlaufbauwerk des Entlastungsstollens Thalwil entlastet bei Hochwasser in der Sihl einen bestimmten Teil des Abflusses über einen Stollen in den Zürichsee. Das Bauwerk wurde von der IUB Engineering AG dimensioniert und in physikalischen Modellversuchen an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich untersucht und optimiert. Die physikalischen Modellversuche bestätigten die in der Dimensionierung berechnete Trenncharakteristik und zeigten zudem die Auswirkung des Bauwerks auf den Geschiebetransport. Das Geschiebe wird bei grossen Hochwasserereignissen am Einlaufbauwerk vorbei transportiert. Bei kleinen Hochwasserereignissen konnte die Geschiebedurchgängigkeit durch die Vorwegnahme von Verlandungskörpern im Projektzustand signifikant verbessert werden. Ausserdem wurden der Schwemmholzeintrag sowie verschiedene Überlastfälle und die Hochwassersicherheit im Bauzustand untersucht. Das Einlaufbauwerk weist in allen untersuchten Szenarien generell ein gutmütiges Verhalten auf.

## **Abstract**

The intake structure of the Thalwil diversion tunnel diverts parts of the discharge during floods from the Sihl River into Lake Zurich. The structure designed by IUB Engineering Ltd. was examined and optimized in physical model tests at the Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) of ETH Zurich. The physical model tests confirmed the predicted flow distribution between the diversion tunnel and the residual river discharge. Furthermore, they showed the functionality of the intake structure regarding bed load transport. During major flood events, bed load is transported by secondary currents in the river bend past the intake structure. At small flood events, sediment continuity could be significantly improved by implementing depositions of bed material as they occur at high floods as initial condition. Moreover, driftwood retention, various overload scenarios and flood protection during construction of the diversion tunnel were investigated. In general, the intake structure shows a docile behavior in these situations.

## 1 Ausgangslage

Das Einlaufbauwerk (EBW) des Entlastungsstollens Thalwil garantiert die Hochwassersicherheit der Stadt Zürich, indem es bei Hochwasser in der Sihl einen bestimmten Teil des Abflusses über den Stollen in den Zürichsee leitet (Stucki und Oplatka, 2020, s. dieser Tagungsband). Die Wasserentnahme erfolgt unterstrom des bereits realisierten Schwemmholzrechens im Rütiboden über einen regulierten Seitenüberfall. Dessen Lage und Trenncharakteristik wurden bereits im Rahmen der hydraulischen Modellversuche zum Schwemmholzrechen untersucht (VAW, 2013). Basierend auf den Modellversuchen wurden im Vorprojekt zwei Varianten des EBW ausgearbeitet. Einerseits wurde ein unregulierter Seitenüberfall mit langer Wehrschwelle ( $L = 150$  m) und tiefem Ansprungpunkt (ca.  $HQ_2$ ) und andererseits ein reguliertes Bauwerk mit verkürzter Wehrschwelle ( $L = 80$  m) und höherem Ansprungpunkt (ca.  $HQ_{10}$ ) vorgeschlagen (IG Sihl-Entlastungsstollen, 2017). Aufgrund der Reguliermöglichkeit und des höheren Ansprungpunkts wurde entschieden, das verkürzte Bauwerk auszuarbeiten. Das EBW wurde durch die IUB Engineering AG dimensioniert und von der VAW in einem physikalischen Modell überprüft. Die Ziele der Versuche bestanden darin, die Strömungszustände im EBW und insbesondere die Trenncharakteristik zu bestimmen sowie den Geschiebe- und Schwemmholztransport zu untersuchen und daraus Optimierungsmöglichkeiten abzuleiten.

## 2 Hydraulische Auslegung

Das EBW besteht aus einer festen Wehrschwelle mit aufgesetzten, luftgefüllten Schlauchwehren (Abb. 1). Das gefasste Wasser fliesst nach dem Überfall in eine trichterförmige Sammelrinne. Reguliert durch eine Drosselblende gelangt es in den Stollen und fliesst in schiessendem Freispiegelabfluss bis zum Auslaufbauwerk (Schroeder *et al.*, 2021, s. dieser Tagungsband). Hinter der Drosselblende ist ein Revisions- und Sicherheitsorgan eingebaut, womit der Stollen gegen das Oberwasser abgeschottet werden kann. Das EBW ist zur Sihl hin mit einer Tauchwand und einem Grobrechen ausgerüstet, um den Eintrag von Schwemmholz zu verhindern. Es ist in die rechtsufrige Böschung eingebunden und nach oben mit einer Betondecke abgeschlossen. Damit das EBW möglichst optimal angeströmt wird, werden unterstrom davon zwei über die heutige Sohlenlage der Sihl ragende Sohlschwellen eingebaut und das Gerinne von rund 40 m Breite oberstrom auf 15 m Breite am Ende des Einlaufbauwerks verengt (VAW, 2013).

Grundsätzlich wurde das EBW so ausgelegt, dass mittlere Hochwasser bis zu einem Abfluss von  $Q_{Sihl} = 250$  m<sup>3</sup>/s (ca.  $HQ_{10}$ ) abfliessen, ohne dass die Entlastung anspringt. Durch den möglichst späten Ansprungpunkt soll der Geschiebe-

haushalt unterstrom des EBW bei kleineren, morphologisch aktiven Hochwassern möglichst unbeeinflusst bleiben. Da aber bei extremen Hochwassern eine sehr grosse Wassermenge entlastet werden muss, wurde der Überfall mit regulierbaren Schlauchwehren ausgestattet, die auf die feste Wehrschwelle abgesenkt werden können. Bei einem Dimensionierungsabfluss von  $Q_{Sihl} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $HQ_{500}$ ) soll ein Abfluss von  $Q_{Stollen} = 330 \text{ m}^3/\text{s}$  entlastet werden. Diese Anforderungen an den Anspringpunkt und die Entlastungskapazität bestimmen die Höhe und Länge der Wehrschwelle sowie die Höhe der Schlauchwehre.

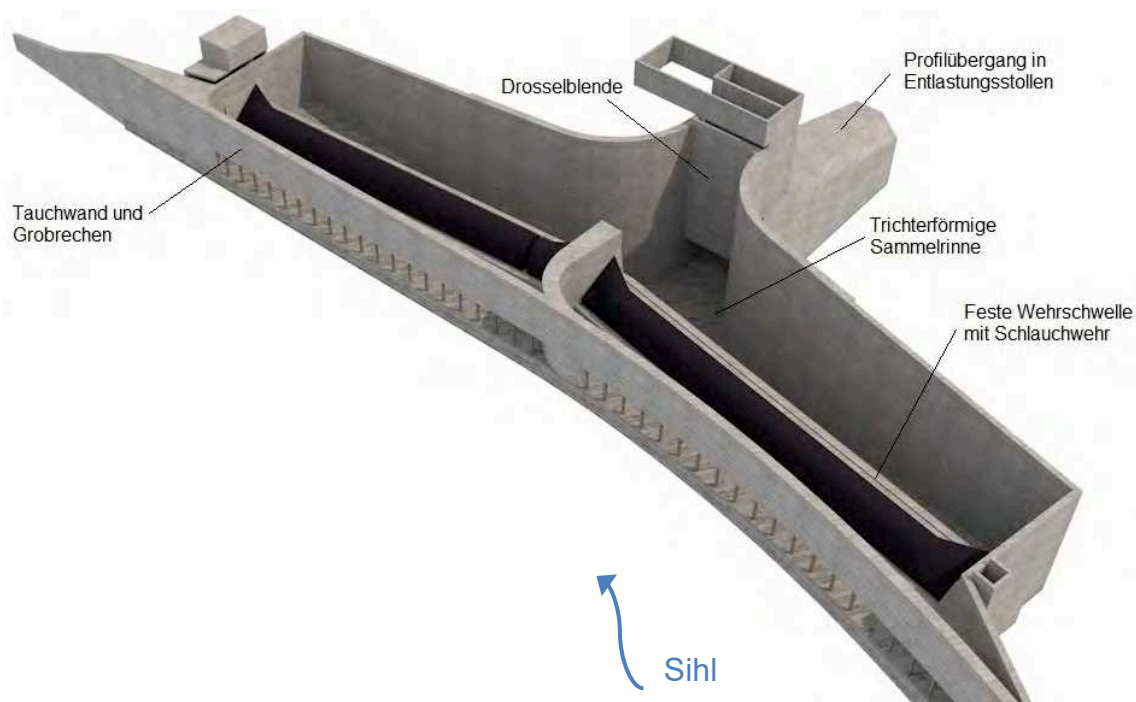


Abb. 1: 3D-Darstellung des geplanten Einlaufbauwerks. Ansicht gemäss Vorprojekt und ohne Bauwerksdecken. (Quelle: IUB Engineering AG)

### 3 Dimensionierung des Bauwerks

Auf Stufe Bau- und Auflageprojekt erfolgte die Dimensionierung sowie eine detaillierte hydraulische Überprüfung des Bauwerks (IG Sihl-Entlastungsstollen, 2019). Folgende Aspekte wurden mittels analytischer Berechnungen und numerischer Simulationen in HYDRO\_AS-2D überprüft:

- Anspringpunkt der Hochwasserentlastung
- Abflussaufteilung in Stollen- und Restabfluss (Trenncharakteristik)
- Abflussaufteilung zwischen den einzelnen Wehrfeldern
- Wasserspiegellagen und Energielinien im Bauzustand

Die Berechnung der Trenncharakteristik mittels gängiger hydraulischer Formeln basiert auf der Wechselwirkung zwischen Wehrüberfall und Schützenabfluss unter der Drosselblende. Der Stollenabfluss hängt vom Wasserstand in der Sammelrinne vor der Drosselblende ab, der wiederum die Kapazität des Seitenwehrs bei einer bestimmten Wasserspiegellage in der Sihl beeinflusst.

Aus den Berechnungen und der numerischen Modellierung ergab sich ein Bauwerk, das die in Abb. 3 illustrierte Trenncharakteristik aufweist und als Ausgangskonfiguration für die hydraulischen Modellversuche diente. Das EBW wies demnach zwei Schlauchwehrfelder mit einer Überfalllänge von  $L = 40$  m und einer festen mittleren Überfallkante von 471.50 m ü.M. bei vollständig abgesenkten Schlauchwehren resp. von 474.00 m ü.M. bei geschlossenen Schlauchwehren auf. Weiter wurde empfohlen, bei Erreichen eines Gesamtabflusses von  $Q_{Sihl} = 250$  m<sup>3</sup>/s die Schlauchwehre zunächst um 0.50 m teilweise abzusenken und erst bei einer weiteren Zunahme des Abflusses in der Sihl komplett abzusenken. Damit wird eine stetige Zunahme des Stollenabflusses gewährleistet.

## **4 Physikalische Modellversuche**

### **4.1 Modell**

Die numerisch optimierte Konfiguration des EBW wurde an der VAW in einem physikalischen Modell untersucht (VAW, 2020). Das Modell wurde gemäss Froud'scher Modellähnlichkeit im Massstab 1:30 errichtet und umfasst einen Flussabschnitt von 450 m Länge mit beweglicher Sohle, dem EBW und den ersten 120 m des Entlastungsstollens (Abb. 2).



Abb. 2: Physikalisches Modell des Einlaufbauwerks im Massstab 1:30 beim Dimensionierungsabfluss ( $HQ_{500} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

## 4.2 Resultate

Die physikalischen Modellversuche bestätigten, dass die angestrebte Trenncharakteristik mit der vorgeschlagenen Auslegung der IUB Engineering AG erreicht wird. Die im Modell gemessene Trenncharakteristik ist in Abb. 3 dargestellt. Sie zeigt den Stollenabfluss  $Q_{\text{Stollen}}$  bei Voll- (VA) und Teilabsenkung (TA) der Schlauchwehre als Funktion des Gesamtabflusses  $Q_{\text{Sihl}}$ . Im Dimensionierungsfall ( $Q_{\text{Sihl}} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ) wird ein Abfluss von  $Q_{\text{Stollen}} = 330 \text{ m}^3/\text{s}$  entlastet und ein Abfluss von  $Q_{\text{Rest}} = 270 \text{ m}^3/\text{s}$  verbleibt in der Sihl. Dabei stellten sich im Einlaufbauwerk bis auf einen lufteinziehenden Wirbel die gewünschten hydraulischen Strömungsbedingungen ein. Der Wirbel vor der Drosselblende in der Sammelrinne konnte mit einer Trennwand unterbunden werden.

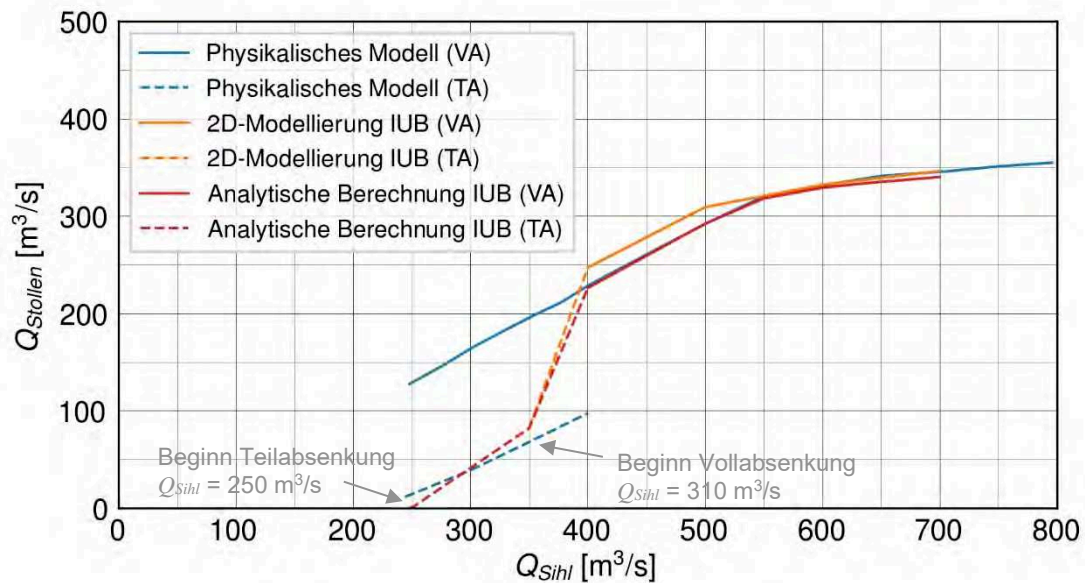


Abb. 3: Trenncharakteristik des Einlaufbauwerks. Angegeben sind neben den Planungsgrößen der IUB Engineering AG die Messwerte im physikalischen Modell. Durchgezogene Linien entsprechen einer Vollabsenkung (VA), gestrichelte Linien einer Teilabsenkung (TA) der Schlauchwehre resp. dem Übergang zwischen Teil- und Vollabsenkung.

Ausserdem zeigt die Trenncharakteristik in Abb. 3, dass die Abflusskontrolle zunächst beim Wehrüberfall liegt und dann auf die Drosselblende übergeht. Bei Gesamtabflüssen zwischen  $Q_{Sihl} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q_{Sihl} = 550 \text{ m}^3/\text{s}$  steigt der Stollenabfluss mit zunehmendem Gesamtabfluss relativ rasch an. Der Stollenabfluss wird dabei durch den Wehrüberfall kontrolliert. Ab einem Gesamtabfluss von  $Q_{Sihl} > 550 \text{ m}^3/\text{s}$  wird der Stollenabfluss durch die Drossel begrenzt. Der Wasserstand in der Sammelrinne steigt dann schnell an und staut den Wehrüberfall ein. Bei einem Gesamtabfluss von  $Q_{Sihl} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $EHQ = 650 \dots 800 \text{ m}^3/\text{s}$ ) wird ein Abfluss von  $Q_{Stollen} = 355 \text{ m}^3/\text{s}$  entlastet. Der Stollenabfluss ist in diesem Fall nur um  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  grösser als im Dimensionierungsfall und der Restabfluss von  $Q_{Rest} = 445 \text{ m}^3/\text{s}$  liegt knapp unter dem Abfluss von  $Q_{Rest} = 490 \text{ m}^3/\text{s}$ , welcher gemäss Modellversuchen der VAW (2015) der Kapazitätsgrenze der Sihl in der Innenstadt Zürichs entspricht.

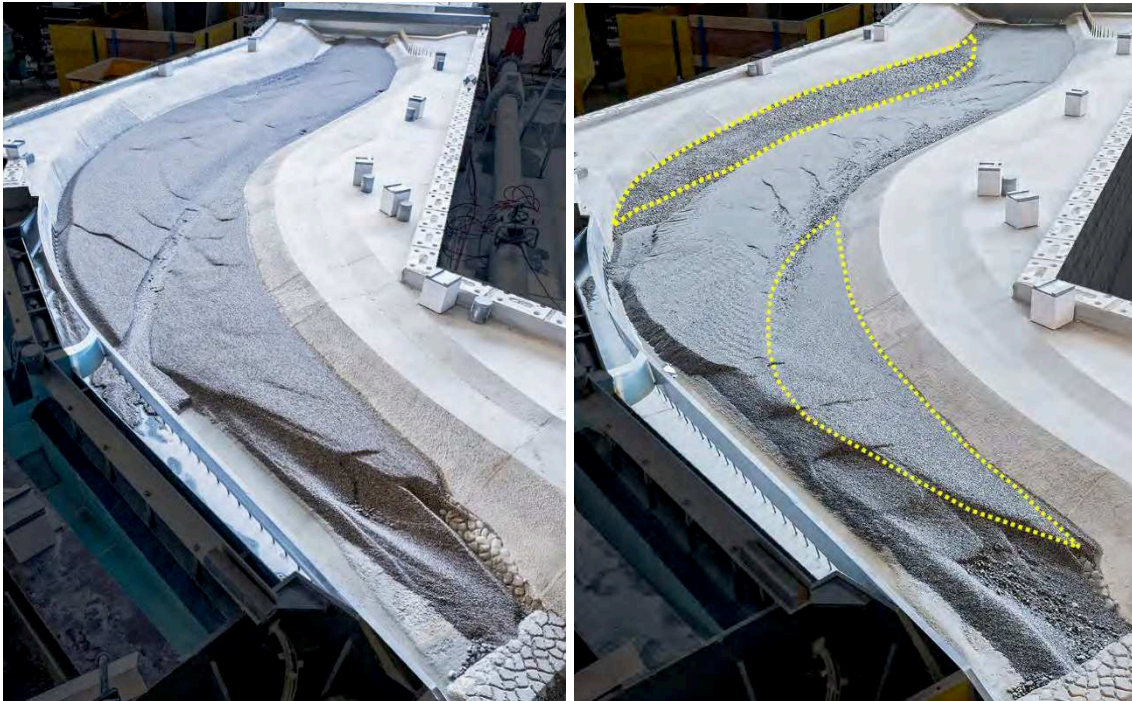


Abb. 4: Flusssohlen am Ende von stationären Gleichgewichtsversuchen bei  $HQ_2$ . Auf der Ausgangssohle ohne Verlandungskörper (links) landete deutlich mehr laufendes Geschiebe auf als auf der Ausgangssohle mit Verlandungskörpern (rechts). Die Verlandungskörper (gelb markiert) liegen oberstrom des EBW und in der Innenkurve gegenüber dem EBW (von laufendem Geschiebe überdeckt).

Eine wesentliche Fragestellung neben der Trenncharakteristik war der Einfluss des Bauwerks auf den Geschiebetransport in der Sihl. Es konnte nachgewiesen werden, dass während grossen Hochwasserereignissen ( $HQ_{100}$  und  $HQ_{500}$ ) mehr als 75% des zugegebenen Geschiebes am EBW vorbei transportiert wird. Aufgrund der Kurvensituation und der dadurch erzeugten Sekundärströmung wird kaum Geschiebe in den Stollen eingetragen. Bei kleinen Hochwasserereignissen zeigte sich jedoch, dass die Sohlschwellen unterstrom des EBW, welche als Kontrollquerschnitt dienen, einen Rückstau verursachen, der die Durchgängigkeit von laufendem Geschiebe beeinträchtigte und zu Auflandungen oberstrom und entlang des EBW führte. Bei stationären Gleichgewichtsversuchen ( $HQ_2$ ) wurde in etwa die fünf- bis zehnfache Jahresfracht abgelagert ( $V_{dep} = 10'500 \text{ m}^3$ ), bevor Geschiebe am Bauwerk weitertransportiert wurde. Zur Verbesserung der Geschiebedurchgängigkeit wurden in die Ausgangssohle zwei Verlandungskörper integriert, deren Form sich an Verlandungskörper anlehnt, die im Modell bei extremen Hochwasserereignissen ( $HQ_{500}$ ) entstehen. Die Verlandungskörper verengen die abflusswirksame Breite und schaffen ein Leitgerinne, durch welches laufendes Geschiebe signifikant besser transportiert wird. Dadurch konnten die Auf-



landungen in den Gleichgewichtsversuchen auf die ein- bis zweifache Jahresfracht reduziert werden ( $V_{dep} = 2'300 \text{ m}^3$ ). Abb. 4 zeigt die Auflandungen von laufendem Geschiebe ohne und mit dem Einbau der Verlandungskörper.

Ausserdem zeigten die Versuche, dass trotz des Schwemmholzrechens direkt oberstrom des EBW mit Eintrag von Schwemmholz in den Entlastungsstollen zu rechnen ist, und zwar insbesondere bei mittleren Hochwasserereignissen mit tieferen Wasserspiegellagen und relativ geringer Eintauchtiefe der Tauchwand. Vom zugegebenen Schwemmholz wurden maximal 15% resp.  $90 \text{ m}^3$  (Lockervolumen) in den Stollen eingetragen. Dabei handelte es sich hauptsächlich um Astholz mit Längen zwischen 1 m und 5 m und selten um Stammholz mit einer maximalen Länge von 7.5 m. Das eingetragene Schwemmholz blieb praktisch nie im EBW liegen, sondern wurde direkt in den Stollen gespült. Aufgrund des Schwemmholzeintrags musste das Auslaufbauwerk in den zeitgleich stattfindenden Modellversuchen entsprechend optimiert werden (Schroeder *et al.*, 2021, s. dieser Tagungsband).

## 5 Zusammenfassung

Das Einlaufbauwerk (EBW) des Entlastungsstollens Thalwil wurde auf Stufe Bauprojekt von der IUB Engineering AG dimensioniert und in einem physikalischen Modell an der VAW untersucht. Die Modellversuche konnten die in der Dimensionierung berechnete Trenncharakteristik bestätigen und zeigten, dass beim Dimensionierungsabfluss von  $Q_{Sihl} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $HQ_{500}$ ) ein Stollenabfluss von  $Q_{Stollen} = 330 \text{ m}^3/\text{s}$  entlastet wird. Die hydraulischen Bedingungen entsprachen grundsätzlich den Erwartungen. Der lufteinziehende Wirbel direkt an der Drosselblende konnte durch eine Trennwand unterdrückt werden. Ausserdem wurde in den physikalischen Modellversuchen festgestellt, dass das Geschiebe bei grossen Hochwasserereignissen zum Grossteil weitertransportiert und kaum in den Stollen eingetragen wird. Bei kleinen Hochwasserereignissen wurde der Transport von laufendem Geschiebe durch den Einbau von zwei Verlandungskörpern deutlich optimiert. Darüber hinaus zeigten die Versuche, dass trotz oberstrom gelegenen Schwemmholzrechen sowie Tauchwand und Grobrechen am EBW mit vereinzelt Eintrag von Schwemmholz gerechnet werden muss. Insgesamt bestätigten die physikalischen Modellversuche zusammen mit der numerischen Simulation im Vorfeld die angestrebte Funktionalität des EBW.

## Referenzen

- 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.
- Schroeder, A., Billeter, P., Boes, R., Keller, Y., Lais, A., Stucki, A. (2021). Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat - Auslaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil. Wasserbau-Symposium 2021, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) Nr. 262-263*, ETH Zürich.
- IG Sihl-Entlastungsstollen (2017). Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat. Entlastungsstollen Thalwil. Technischer Bericht des Vorprojekts. 14.51330.31-710. Zürich.
- IG Sihl-Entlastungsstollen (2019). Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat. Entlastungsstollen Thalwil. Hydraulische Berechnungen. Beilage 8 zum Technischen Bericht des Auflageprojekts. 85W-745-12-0. Zürich.
- VAW (2013). Einlaufbauwerk Entlastungsstollen Sihl Standort Rütiboden. VAW Bericht Nr. 4293/2. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
- VAW (2015). Sihldurchlässe Hauptbahnhof Zürich. VAW Bericht Nr. 4308. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- VAW (2020). Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat. Entlastungsstollen Thalwil. Physikalische Modellversuche zum Einlaufbauwerk. VAW Bericht Nr. 4370. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.

## Adressen der Autoren

Andris Wyss (korrespondierender Autor)  
Prof. Dr. Robert Boes, Dr. Volker Weitbrecht, Florian Hinkelammert-Zens  
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich  
CH-8093 Zürich, Höggerbergring 26  
[wyss@vaw.baug.ethz.ch](mailto:wyss@vaw.baug.ethz.ch)

Peter Billeter, Michael Müller  
IUB Engineering AG  
CH-3000 Bern, Belpstrasse 48

Adrian Stucki  
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zürich  
CH-8090 Zürich, Walcheplatz 2