

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

Artikel: Entlastungsstollen Thalwil : physikalische Modellversuche zum Einlaufbauwerk
Autor: Wyss, Andris / Billeter, Peter / Boes, Robert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-966193>

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: 15.01.2026

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

Entlastungsstollen Thalwil – physikalische Modellversuche zum Einlaufbauwerk

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

Zusammenfassung

Das Einlaufbauwerk des Entlastungsstollens Thalwil kontrolliert in Zukunft die Entlastung von Hochwasserabflüssen aus der Sihl in den Zürichsee. Damit spielt es für die Hochwassersicherheit der Stadt Zürich eine entscheidende Rolle. Seine Funktionalität wurde deswegen in einem physikalischen Modell im Massstab 1:30 an der VAW geprüft und optimiert. Die Modellversuche zeigten, dass das Einlaufbauwerk für ein breites Spektrum von Szenarien die angestrebten Entlastungswassermengen in den Stollen ermöglicht. Im Weiteren wurde in Versuchen zum Geschiebe- und zum Schwemmholttransport sowie zu Überlastszenarien nachgewiesen, dass sich das Einlaufbauwerk generell robust verhält. Durch bauliche Anpassungen am Einlaufbauwerk resp. flussbauliche Massnahmen in der Sihl konnten zudem lufteinziehende Wirbel unterdrückt werden sowie der Einfluss des Einlaufbauwerks auf den Geschiebehaushalt in der Sihl bei kleinen Hochwasserereignissen signifikant verminder werden. Das optimierte Einlaufbauwerk des Entlastungsstollens Thalwil hat in den Modellversuchen alle Anforderungen erfüllt, um in Zukunft die Hochwassersicherheit der Stadt Zürich und des unteren Sihltals zu gewährleisten.

1. Einleitung

Der Entlastungsstollen Thalwil soll in Zukunft einen Teil der Hochwasserabflüsse der Sihl in den Zürichsee entlasten, um die Stadt Zürich vor Hochwasser zu schützen (Stucki, 2021). Die Wassermenge, die im Hochwasserfall in den Entlastungsstollen abgeleitet werden muss, wird dabei durch das Einlaufbauwerk des Entlastungsstollens kontrolliert. Damit ist das Einlaufbauwerk von zentraler Bedeutung für den Hochwasserschutz der Stadt Zürich. Im Extremfall könnten bei einer Fehlfunktion des Einlaufbauwerks Überflutungen in der Stadt Zürich und folglich Schäden in Milliardenhöhe nicht verhindert werden.

1.1 Anforderungen an das Einlaufbauwerk

Damit die Funktionalität des Einlaufbauwerks gewährleistet werden kann, stellen sich aus flussbaulicher Sicht die folgenden Anforderungen: In erster Linie muss das Einlaufbauwerk seine hydraulische Funktion erfüllen. Diese umfasst einerseits die Garantie einer bestimmten Trenncharakteristik, also der Ausleitung einer bestimmten Wassermenge in Abhängigkeit des Gesamtabflusses in der Sihl, und andererseits

das Vermeiden von ungünstigen Strömungszuständen im Bauwerk selbst. Die Trenncharakteristik des Einlaufbauwerks wurde im Vorprojekt festgelegt (*IG Sihl-Entlastungsstollen, 2017*). Demzufolge soll bei einem Gesamtabfluss in der Sihl von $Q_{Ges} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{500}) ein Stollenabfluss von $Q_{St} = 330 \text{ m}^3/\text{s}$ entlastet werden. Damit verbleibt ein Restabfluss von $Q_R = 270 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Sihl. Dieser Abfluss kann mit einem Freibord von 1 m durch die Durchlässe am Hauptbahnhof Zürich, dem «Nadelöhr der Sihl», abgeführt werden (VAW, 2015; Hinkelammert-Zens et al., 2018). Im Weiteren wurde im Vorprojekt festgelegt, dass die Entlastung erst bei einem Gesamtabfluss von $Q_{Ges} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. HQ_{10}) anspringen soll. Durch diesen relativ hohen Ansprungpunkt wird die morphologische Dynamik der Sihl unterstrom des Einlaufbauwerks bei kleinen Hochwasserereignissen (< HQ_{10}) nicht weiter beeinträchtigt, was eine wichtige Voraussetzung für einen guten ökologischen Zustand der Sihl ist. Zudem muss das Einlaufbauwerk den Stollenabfluss auf den Bemessungsabfluss des Stollens ($Q_{St} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$) beschränken.

Neben den Anforderungen an die hydraulische Funktion stellen sich zusätzliche Anforderungen an den Einfluss des Bau-

werks auf den Geschiebehaushalt in der Sihl. So muss sichergestellt werden, dass der Geschiebetransport in der Sihl und das Einlaufbauwerk sich nicht gegenseitig negativ beeinflussen. Bei mittleren und grossen Hochwasserereignissen ($\geq HQ_{30}$) könnte der Eintrag von Geschiebe in das Einlaufbauwerk die Funktionalität des Stollens sowie des Auslaufbauwerks (Schroeder et al., 2021, in diesem Heft) beeinträchtigen. Außerdem könnten Geschiebeablagerungen vor dem Einlaufbauwerk die Hydraulik und damit die Trenncharakteristik stark beeinflussen. Im Gegensatz dazu steht bei kleinen Hochwasserereignissen (< HQ_{10}) die ökologische Funktion des Geschiebetransports im Vordergrund. Solange das laufende Geschiebe am Einlaufbauwerk vorbei transportiert und nicht abgelagert wird, wird die Sihl unterstrom des Einlaufbauwerks mit laufendem Geschiebe versorgt. Dies verhindert eine weitere Verfestigung bzw. Deckschichtbildung der Sohle und eine weitere Verschlechterung der Substratqualität.

Neben Geschiebe kann auch Schwemmholt die Funktion des Einlaufbauwerks beeinträchtigen. Am Einlaufbauwerk sind zwar aufgrund des direkt oberstrom liegenden Schwemmholtrechens Rütiboden keine grossen Schwemmholtvolumen zu erwarten (Hinkelammert-Zens et al., 2018; Hochstrasser et al. 2018), einzelne Hölzer werden den Rechen jedoch passieren. Insofern muss sichergestellt werden, dass einerseits möglichst wenig Schwemmholt in das Einlaufbauwerk eingetragen wird und andererseits keine grossen Verklauungen am Grobrechen des Einlaufbauwerks entstehen. Eingetragenes Schwemmholt könnte die Funktionsweise des Stollens oder seines Auslaufbauwerks beeinträchtigen, was im schlimmsten Fall zum Versagen des Gesamtsystems führen kann. Daneben kann ein hoher Verklausungsgrad am Grobrechen den Stollenabfluss reduzieren, was wiederum die Trenncharakteristik beeinflusst, sodass im Extremfall Überflutungen in der Stadt Zürich nicht vermieden werden könnten.

1.2 Modellversuche im Jahr 2013

Die ersten Modelluntersuchungen zum Einlaufbauwerk wurden bereits im Jahr 2013 durchgeführt (VAW, 2013; Hinkeleammert-Zens et al., 2018). Das Hauptziel der Untersuchungen bestand darin, die Lage des Einlaufbauwerks und dessen grundlegendes Design zu prüfen und hinsichtlich Anspringpunkt und Trenncharakteristik zu optimieren. Die Versuche bestätigten die grundsätzliche Machbarkeit des Einlaufbauwerks, jedoch wurden auch Schwächen im Design erkannt. So lag der Anspringpunkt des ursprünglichen Entwurfs bei nur ca. HQ_2 aufgrund seiner Auslegung als seitliches Fassungsbauwerk mit fester Wehrschwelle. Dieser tiefe Anspringpunkt hätte den Geschiebetrieb in der Sihl unterstrom des Einlaufbauwerks entsprechend häufig beeinflusst. Außerdem wurde in den Versuchen beobachtet, dass relativ viel Geschiebe über die feste Wehrschwelle in das Einlaufbauwerk eingetragen wurde. Infolgedessen wurde das Design des Einlaufbauwerks von der IG Sihl-Entlastungsstollen im Vor- und Bau Projekt überarbeitet und optimiert. Zu den grössten Änderungen gehörte der Einsatz von regulierbaren Schlauchwehren auf der festen Wehrschwelle. Dadurch sollte der Anspringpunkt von ca. HQ_2 auf HQ_{10} erhöht werden. Gleichzeitig ermöglichen die Schlauchwehre eine tiefere Oberkante der festen Wehrschwelle, was die spezifische Entlastungskapazität erhöhte und die Bauwerkslänge verringerte. Ferner wurde die Lage des Bauwerks durch eine Verschiebung bis unterstrom des Kurvenscheitels verändert, was den Eintrag von Geschiebe durch eine bessere Ausnutzung des Umlenkeffekts (kurven-induzierte Sekundärströmung) vermindern sollte.

1.3 Ziel der aktuellen Untersuchung

Durch die beschriebenen Anpassungen veränderte sich das Design des Einlaufbauwerks deutlich. Aus diesem Grund wurde das Einlaufbauwerk im Auftrag des AWEL erneut in einem physikalischen Modell an der VAW untersucht. Im Zentrum der Untersuchungen standen Versuche zur Hydraulik, zum Geschiebetransport und zum Schwemmholztransport. Außerdem wurden verschiedene Überlastszenarien sowie der Bauzustand untersucht.

2. Bau- und Funktionsweise des Einlaufbauwerks

Das Einlaufbauwerk des Entlastungsstollens Thalwil wird an der Sihl in Gattikon bei Langnau a.A. erstellt (Stucki, 2021). Es

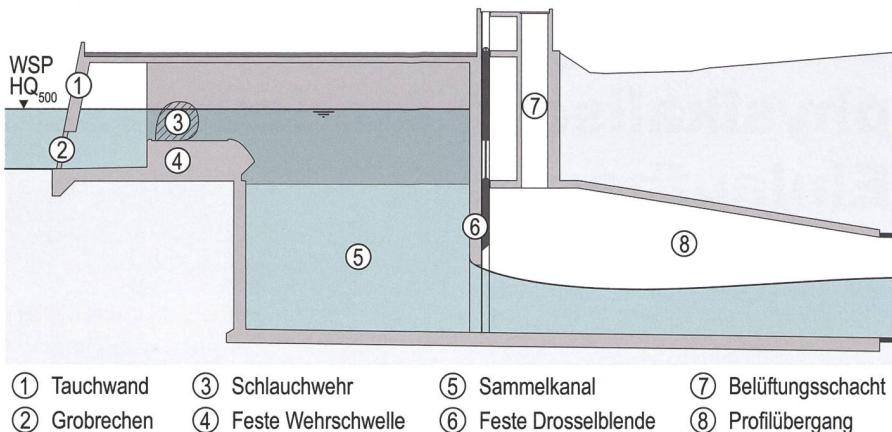
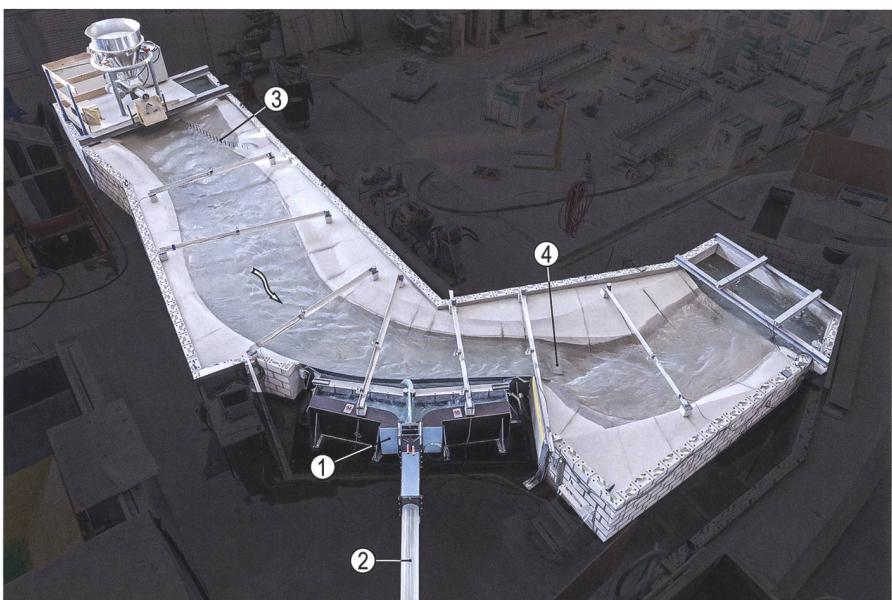


Bild 1: Längsschnitt des Einlaufbauwerks in der Achse des Entlastungsstollens.

liegt in einer Linkskurve unterstrom des bereits realisierten Schwemmholzrechens Rütiboden. Dort wird es in der Aussenkurve als reguliertes Streichwehr (Seitenüberfall) mit einer totalen Überfalllänge von 80m angeordnet. Die hydraulisch wichtigsten Bestandteile des Einlaufbauwerks sind im Längsschnitt in Bild 1 dargestellt. Vor dem Seitenüberfall sind eine Tauchwand ① sowie ein Grobrechen ② mit lichtem Stababstand von 2m zur Abweisung von Schwemmholz angebracht. Der Seitenüberfall besteht aus einer festen Wehrschwelle ④ mit aufgesetzten Schlauchwehren ③, welche in zwei Wehrfeldern von je 40m Überfalllänge angeordnet sind. Die Schlauchwehre können in drei verschiedenen Wehrstellungen betrieben werden: vollständig abgesenkt, teilweise abgesenkt und vollständig aufgestellt, d.h. geschlossen. Bei Gesamtabflüssen bis $Q_{Ges} < 250 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. HQ_{10}) blei-

ben die Schlauchwehre geschlossen, um den Geschiebetrieb in der Sihl unterstrom des Einlaufbauwerks aufrechtzuerhalten. Ihre Oberkante liegt in diesem Fall 2,5m über der festen Wehrschwelle. Ab Gesamtabflüssen von $Q_{Ges} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ werden die Schlauchwehre um 0,5m teilabgesenkt. Dadurch können kleine Abflüsse entlastet werden. Steigt der Gesamtabfluss weiter an, so können die Schlauchwehre vollständig auf die feste Wehrschwelle abgesenkt werden. Hinter dem Überfall wird das Wasser in einem Sammelkanal ⑤ gefasst und fliesst unter einer festen Drossel ⑥ in den Stollen. Die feste Drossel beschränkt den Stollenabfluss bei hohen Gesamtabflüssen in der Sihl und stellt Freispiegelabfluss im Stollen sicher. Zusätzlich zu den in Bild 1 dargestellten Bestandteilen des Einlaufbauwerks sind zwei Sohlschwellen aus Riegelsteinen zu erwähnen, welche in der Sihl unterstrom des Einlaufbauwerks



① Einlaufbauwerk ② Entlastungsstollen ③ Schwemmholzrechen Rütiboden ④ Sohlschwellen

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

quer zur Fließrichtung eingebaut werden (*Bild 2*). Sie dienen als Kontrollquerschnitt und verursachen einen leichten Rückstau, der für eine optimale Anströmung des Einlaufbauwerks sorgt.

3. Methodik

3.1 Physikalisches Modell

Zur Untersuchung des Einlaufbauwerks wurde ein physikalisches Modell im Massstab 1:30 nach dem Froud'schen Ähnlichkeitsgesetz (*Heller, 2011*) gebaut. Das Modell umfasste 430 m Fließstrecke der Sihl, das Einlaufbauwerk sowie die ersten 120 m des Entlastungsstollens (*Bild 2*). Der Modellperimeter beginnt am unteren Ende des Schwemmholtrechens Rütiboden. Auf die Nachbildung einer längeren Zulaufstrecke inklusive des kompletten Schwemmholtrechens konnte verzichtet werden, weil das Einlaufbauwerk vom Schwemmholtrechen hydraulisch entkoppelt ist (*VAW, 2013*) und die Wasserspiegellagen entlang des Einlaufbauwerks im Wesentlichen durch die Sohlschwellen kontrolliert werden.

Die Flusstopografie wurde im Modell aus Beton gefertigt und ihre Rauheit an die natürlichen Verhältnisse angepasst. Eine Besonderheit der Sihl am Standort Rütiboden liegt darin, dass der Molassefels durchgehend etwa 1,5–2,0 m unter der Flussohle ansteht. Aus diesem Grund wurde die Modellsohle auf der Höhe des Felshorizonts fest eingebaut. Im Gegensatz zur Topografie aus Beton wurden die Bestandteile des Einlaufbauwerks grösstenteils aus PVC und Polystyrol gefertigt. Der modellierte Abschnitt des Entlastungsstollens wurde aus Acryglas gebaut. Die Schlauchwehre wurden durch verschiedene Einbauten in zwei Wehrstellungen (geschlossen und teilweise abgesenkt) nachgebildet. Dies erlaubte die Messung des Stollenabflusses in den jeweiligen Wehrstellungen.

Die wichtigsten hydraulischen Messgrößen wurden kontinuierlich erfasst. Dazu zählen der Modellzufluss (Gesamt- abfluss der Sihl, Q_{Ges}), der Stollenabfluss (Q_{St}) und die Wasserspiegellagen in der Sihl und im Einlaufbauwerk. Die Geschiebezugabe am Modelleinlauf sowie der Geschiebeaustrag am Modellauslauf wurden ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet.

3.2 Modellsediment

Zur Modellierung des Geschiebetransports wurden zwei Modellsedimente mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung eingesetzt: grobes Sohlenmaterial mit $d_m=8 \text{ cm}$ und feines laufendes Geschiebe mit $d=4 \text{ cm}$. Das Sohlenmaterial wurde ge-

mäss Proben des Sihl-Sohlenmaterials aus Fraktionen zwischen $d_{\min}=0,8 \text{ cm}$ und $d_{\max}=48,0 \text{ cm}$ zusammengestellt, wohingegen für das laufende Geschiebe nur eine einzelne Siebfraction mit Fraktionsgrenzen von $d_{\min}=3,0 \text{ cm}$ bis $d_{\max}=4,5 \text{ cm}$ verwendet wurde (alle Korndurchmesser im Naturmassstab). Diese Unterscheidung zwischen Sohlenmaterial und laufendem Geschiebe erfolgte, um den Einfluss des Einlaufbauwerks auf den Geschiebetransport bei kleinen ($< HQ_{10}$) sowie mittleren und grossen Hochwassereignissen ($\geq HQ_{30}$) separat zu untersuchen. Bei kleinen Hochwassereignissen wird in der Sihl nur laufendes Geschiebe transportiert, da die Schleppkraft für den Transport des groben Sohlenmaterials bzw. für ein Aufbrechen der Deckschicht nicht ausreicht. Erst ab Abflüssen zwischen $Q_{\text{Ges}}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_{\text{Ges}}=300 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. HQ_5 bis HQ_{30}) ist mit dem Aufbrechen der Sohle und dem Beginn des Transports von Sohlenmaterial zu rechnen (*Flussbau AG, 2010*).

4. Resultate

Dank den Modellversuchen im Jahr 2013 und der sorgfältigen Planung des Vorprojekts konnten die grundsätzliche Funktion des Einlaufbauwerks und insbesondere die angestrebte Trenncharakteristik bereits in den ersten Versuchen nach der In-

betriebnahme des Modells bestätigt werden. Im Verlauf der Modellversuche waren deswegen keine grösseren Anpassungen am Design des Einlaufbauwerks mehr nötig. Dennoch konnten einige Aspekte des Projekts optimiert werden, insbesondere der Geschiebetransport bei kleinen Hochwassereignissen sowie die Strömungsbedingungen im Einlaufbauwerk.

4.1 Hydraulik

4.1.1 Trenncharakteristik des Einlaufbauwerks

Die Trenncharakteristik des Einlaufbauwerks ist in *Bild 3* dargestellt. Die Messungen bestätigen, dass die angestrebten Zielwerte erreicht werden. Beim Dimensionierungsabfluss von $Q_{\text{Ges}}=600 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{500}) wird ein Stollenabfluss von $Q_{\text{St}}=330 \text{ m}^3/\text{s}$ entlassen und ein Restabfluss von $Q_{\text{R}}=270 \text{ m}^3/\text{s}$ verbleibt in der Sihl, was im Rahmen der Messgenauigkeit ($\pm 4 \text{ m}^3/\text{s}$) genau den Zielwerten entspricht. Diese Abflüsse wurden durch eine Anpassung der Drosselöffnung von 4,5 m auf 4,7 m (siehe (6) in *Bild 1*) erreicht. Im Überlastfall bei $Q_{\text{Ges}}=800 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde ein maximaler Stollenabfluss von $Q_{\text{St}}=355 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen. Dieser Abfluss liegt unter der maximalen Kapazität des Entlastungsstollens von $Q_{\text{St}}=400 \text{ m}^3/\text{s}$, womit ein sicherer Betrieb des Stollens gewährleistet ist. Gleichzeitig liegt der Rest-

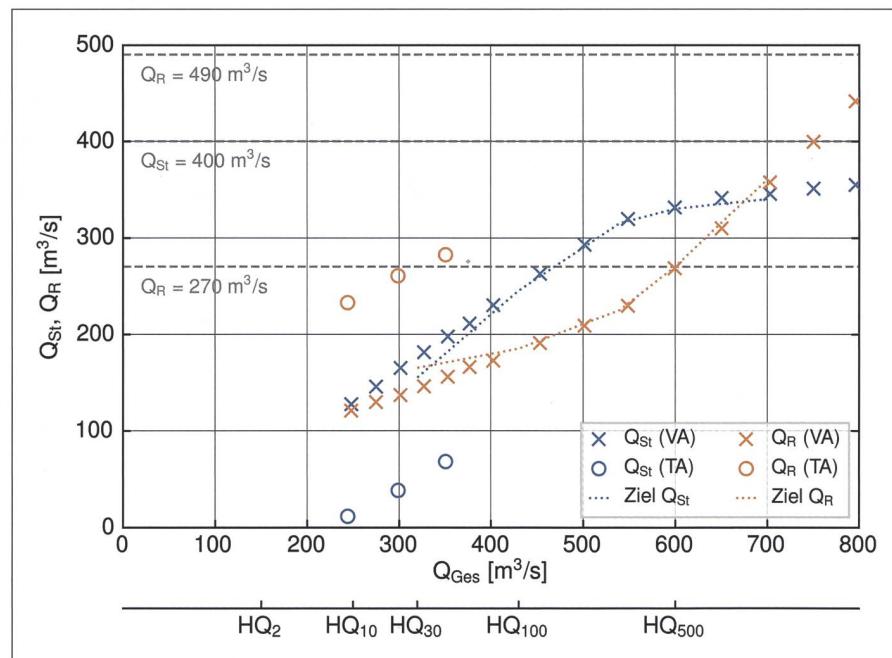


Bild 3: Trenncharakteristik des Einlaufbauwerks mit gemessenen Stollenabfluss (Q_{St}) und Restabfluss in der Sihl (Q_{R}) im Vergleich zu den angestrebten Abflüssen (Ziel Q_{St} und Ziel Q_{R}). Neben den Abflüssen bei Vollabsenkung der Schlauchwehre (VA) sind auch die Abflüsse bei Teilabsenkung (TA) dargestellt. Zudem sind der Restabfluss der Sihl mit Freibord von 1 m ($Q_{\text{R}}=270 \text{ m}^3/\text{s}$) resp. 0 m ($Q_{\text{R}}=490 \text{ m}^3/\text{s}$) in den Durchlässen am HB Zürich sowie der maximale Stollenabfluss ($Q_{\text{St}}=400 \text{ m}^3/\text{s}$) angegeben.

abfluss in der Sihl bei $Q_R=445\text{ m}^3/\text{s}$. Damit wird das geforderte Freibord von 1m in den Durchlässen des Zürcher Hauptbahnhofs zwar nicht mehr eingehalten, jedoch liegt der Abfluss unter dem Grenzwert von $Q_R=490\text{ m}^3/\text{s}$, welcher der maximalen Kapazität der Durchlässe im Freispiegelabfluss (ohne Freibord) entspricht (VAW, 2015; Hinkelammert-Zens et al., 2018).

4.1.2 Abflusskontrolle durch

Wehrüberfall und Schützenabfluss

Aus der Trenncharakteristik in Bild 3 wird ebenfalls ersichtlich, inwiefern der Wehrüberfall und der Schützenabfluss unter der festen Drosselblende den Stollenabfluss kontrollieren. Bei Gesamtabflüssen $Q_{Ges}<550\text{ m}^3/\text{s}$ nimmt der Stollenabfluss bei zunehmendem Gesamtabfluss stark zu. Dabei wird die Entlastung resp. der Stollenabfluss durch den freien Überfall über die feste Wehrschwelle ((4) in Bild 1) kontrolliert. Der Schützenabfluss unter der Drossel ((6) in Bild 1) hat (noch) keinen Einfluss auf den Stollenabfluss und kontrolliert lediglich die Wassertiefe im Sammelkanal. Bei steigendem Gesamtabfluss und zunehmender Entlastung vergrössert sich die Wassertiefe im Sammelkanal, bis der Überfall über die feste Wehrschwelle vom Sammelkanal her eingestaut wird. Ein Einstau stellt sich ab Gesamtabflüssen von ungefähr $Q_{Ges}=550\text{ m}^3/\text{s}$ ein. Dadurch geht die Abflusskontrolle vom Wehrüberfall zum Schützenabfluss über. Bei Gesamtabflüssen von $Q_{Ges}>550\text{ m}^3/\text{s}$ nimmt der Stollenabfluss bei zunehmendem Gesamtabfluss nicht mehr stark zu, weil die Drossel die Entlastung beschränkt. Dadurch wird sichergestellt, dass auch bei extremen Abflüssen die maximale Kapazität des Stollens von $Q_{St}=400\text{ m}^3/\text{s}$ nicht überschritten wird.

4.1.3 Strömungsbedingungen im Einlaufbauwerk

Neben der Messung der Trenncharakteristik wurde das Einlaufbauwerk auf ungünstige Strömungsbedingungen untersucht. Dabei wurde bei sehr grossen Hochwasserabflüssen ($\geq HQ_{500}$) das intermittierende Auftreten von lufteinziehenden Wirbeln im Sammelkanal beobachtet, die Luft unter der Drosselblende hindurch bis in den Profilübergang ((8) in Bild 1) einzogen. Dies führte zu einer bisweilen starken Störung der Strömung und höheren Wassertiefen im Profilübergang. Die Wirbel konnten durch den Einbau einer Trennwand vor der Drosselblende unterdrückt werden.

Eine zweite ungünstige Strömungsbedingung wurde ebenfalls im Profilübergang

festgestellt. Dort tritt bei Stollenabflüssen zwischen $Q_{St}=130\text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_{St}=230\text{ m}^3/\text{s}$ ein Wechselsprung auf, der zu hohen Spiegellagen des Wasser-Luft-Gemisches führt. Dies kann unter Umständen ein Zuschlagen auslösen und die Belüftung des Freispiegelabflusses im Stollen unterbrechen. Ein Zuschlagen konnte im Modell zwar nie beobachtet werden, jedoch ist die Übertragbarkeit von Wasser-Luft-Strömungen von kleinskaligen Modellen auf den Prototyp mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Deswegen wurde aus Sicherheitsgründen empfohlen, die Belüftung des Stollens durch eine geeignete Massnahme sicherzustellen, beispielsweise durch eine zusätzliche Belüftung des Stollens nach dem Profilübergang (Details dazu in VAW, 2020).

Die Versuche zur Hydraulik am Einlaufbauwerk bestätigten somit, dass die hydraulische Funktion des Einlaufbauwerks grundsätzlich gewährleistet ist. In den nachfolgenden beschriebenen Versuchen zum Geschiebe- und Schwemmholztransport sowie in verschiedenen Überlastszenarien wurde die hydraulische Funktion weiter überprüft.

4.2 Geschiebehaushalt

4.2.1 Geschiebetransport bei mittleren und grossen Hochwasserereignissen

Der Geschiebetransport am Einlaufbauwerk wurde für kleine sowie mittlere und grosse Hochwasserereignisse separat untersucht, da Geschiebetransport sowie Hydraulik deutlich abflussabhängig sind. Bei mittleren und grossen Hochwasserereignissen ($\geq HQ_{30}$) wird in der Sihl Sohlenmaterial (ca. $d_m=8\text{ cm}$) transportiert. Gleichzeitig sind die Schlauchwehre des Einlaufbauwerks vollständig abgesenkt und es findet eine Entlastung statt. Bei kleinen Hochwasserereignissen ($< HQ_{10}$) ist die Sohle verschoben, um Sohlenmaterial zu transportieren, sodass nur laufendes Geschiebe (mit ca. $d=4\text{ cm}$) transportiert wird. Außerdem findet bei diesen Abflüssen keine Entlastung statt, da die Schlauchwehre geschlossen bleiben.

Der Geschiebetransport bei mittleren und grossen Hochwasserereignissen wurde in verschiedenen Ganglinienversuchen (HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{500}) untersucht. Darin wur-



Bild 4: Geschiebesohle am Ende eines Ganglinienversuchs beim Dimensionierungsereignis HQ_{500} . Die Verlandungskörper oberstrom des Einlaufbauwerks und in der Innenkurve sind deutlich zu erkennen. Im Leitgerinne und in der Aussenkurve entlang des Einlaufbauwerks wurde das Sohlenmaterial bis auf den Molassefels erodiert.

de überprüft, inwiefern sich die Anpassungen am Einlaufbauwerk gegenüber den Modellversuchen aus dem Jahr 2013 auswirken. Damals war ein bedeutender Eintrag von Geschiebe über die Wehrschwelle ins Einlaufbauwerk beobachtet worden. Dieser Eintrag sollte durch die Verschiebung des Einlaufbauwerks bis unterstrom des Kurvenscheitels verhindert werden. Tatsächlich konnte in den Ganglinienversuchen zu keinem Zeitpunkt ein Eintrag von Geschiebe beobachtet werden. Aufgrund des Umlenkeffekts blieb die Außenkurve vor dem Einlaufbauwerk grösstenteils geschiebefrei. Dies ist u.a. in Bild 4 ersichtlich, welche die Sohle am Ende eines Ganglinienversuchs beim HQ_{500} (Q_{dim}) zeigt.

Neben dem Vermeiden des Geschiebeintrags in den Stollen soll die Geschiebedurchgängigkeit im ursprünglichen Verlauf der Sihl sichergestellt werden. Die Ganglinienversuche zeigten, dass bei mittleren und grossen Hochwasserereignissen über 75 Prozent des zugegebenen Sohlenmaterials am Einlaufbauwerk vorbei in den Modellauslauf transportiert wurde. Die Geschiebedurchgängigkeit ist dementsprechend hoch. Die restlichen 25 Prozent des zugegebenen Sohlenmaterials lagen sich im Modell ab und bildeten zwei Verlandungskörper. Die Verlandungskörper sind ebenfalls in Bild 4 zu erkennen.

Der grössere der beiden Verlandungskörper liegt oberstrom des Einlaufbauwerks auf der rechten Flussseite. Er bildete sich in allen Ganglinienversuchen und wurde auch im Ganglinienversuch bei $EHQ = 700 \text{ m}^3/\text{s}$ nicht erodiert. Während der Bildung dieses Verlandungskörpers verlagerte sich der Geschiebetransport immer stärker auf die linke Flusseite, wo sich durch Erosion eine Art Leitgerinne bildete. Im Ganglinienversuch HQ_{500} wurde das Sohlenmaterial auf dieser Flusseite bis auf den anstehenden Molassefels erodiert (Bild 4). Der Verlandungskörper oberstrom des Einlaufbauwerks besitzt eine grosse Mächtigkeit und ragt bis zu 2,5m über die mittlere Sohlenlage der Sihl. Er wird erst ab Abflüssen um $Q_{Ges} = 430 \text{ m}^3/\text{s}$ (HQ_{100}) vollständig überströmt.

Der kleinere der beiden Verlandungskörper liegt in der Innenkurve gegenüber dem Einlaufbauwerk. Er bildet sich im Verlauf eines Hochwassers relativ schnell aufgrund der Kurvenströmung (Gleitufer), und es wird laufend Geschiebe über ihn transportiert. Im Gegensatz zum grösseren Verlandungskörper oberstrom ragt dieser nur 1,5m über die mittlere Sihlsohle und wird auch schon bei kleinen Hochwasserabflüssen (ab HQ_2) vollständig überströmt.



Bild 5: Sohle vor (oben) und nach (unten) stationären Gleichgewichtsversuchen bei HQ_2 . Im Versuch ohne Verlandungskörper (links) landete deutlich mehr laufendes Geschiebe auf als im Versuch mit Verlandungskörpern (rechts).

Die Bildung der Verlandungskörper führte zu einer deutlichen Umgestaltung der Sohle topografie im untersuchten Flussabschnitt. Trotz der teilweise markanten Veränderungen der Sohle wird die Trenncharakteristik aber nicht beeinträchtigt. Jedoch weist die Bildung der beiden Verlandungskörper darauf hin, dass die Geschiebetransportkapazität bei anlaufenden Hochwassern lokal zu gering ist und durch die Bildung der Verlandungskörper und der damit einhergehenden Verschmälerung des Gerinnes sukzessive erhöht wird. Diese Erkenntnis ist für den Transport von laufendem Geschiebe bei kleinen Hochwasserereignissen von besonderer Bedeutung.

4.2.2 Geschiebetransport bei kleinen Hochwasserereignissen

Im Zentrum der Versuche bei kleinen Hochwasserereignissen ($< HQ_{10}$) stand die Untersuchung des Transports von laufen-

dem Geschiebe ($d=4 \text{ cm}$) bei geschlossenen Schlauchwehren. Bei kleinen Hochwasserereignissen soll das laufende Geschiebe am Einlaufbauwerk vorbei transportiert werden, sodass im Bereich vor dem Einlaufbauwerk kein Geschiebe abgelagert wird und die Geschiebedurchgängigkeit gewährleistet ist. Ein erster Gleichgewichtsversuch bei einem stationären Spitzenabfluss gemäss HQ_2 zeigte jedoch, dass laufendes Geschiebe in grossen Mengen oberstrom und entlang des Einlaufbauwerks abgelagert wurde (Bild 5 unten links). Der Grund für die Ablagerungen waren die Sohlschwellen unterstrom des Einlaufbauwerks, die in Kombination mit der Verengung des Gerinnes und den geschlossenen Schlauchwehren einen Rückstau erzeugten, der den Geschiebetransport unterband. Im Gleichgewichtsversuch HQ_2 landeten zwischen dem Modelleinlauf und den Sohlschwellen rund 10000 m^3 laufendes Geschiebe auf,

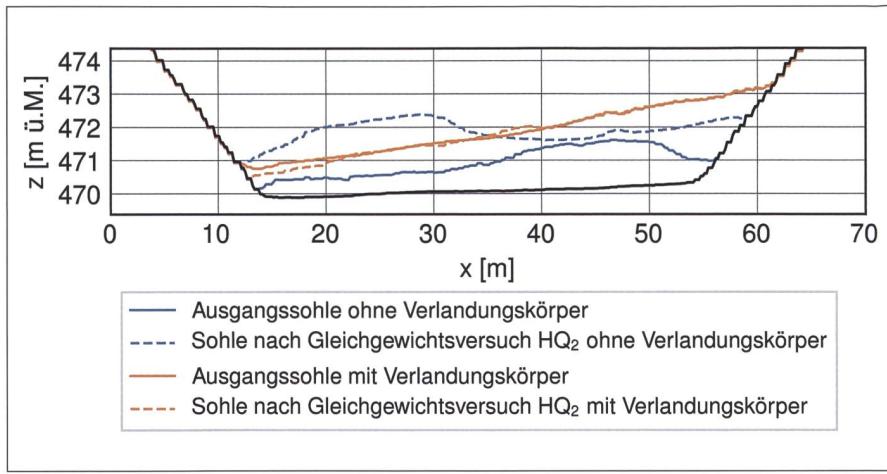


Bild 6: Querprofil oberstrom des Einlaufbauwerks (vgl. Bild 5) durch die Ausgangssohle mit und ohne Verlandungskörper sowie durch die jeweiligen Sohlen nach den Gleichgewichtsversuchen bei HQ₂. Im Versuch ohne Verlandungskörper (blaue Linien) sind deutliche Auflandungen zu erkennen, wohingegen im Versuch mit Verlandungskörper (orange Linien) kaum laufendes Geschiebe auflandete.

bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wurde. Dies entspricht ungefähr dem Zehnfachen der heutigen Jahresfracht von 700 bis 1000 m³/a (Flussbau AG, 2010). Die Geschiebedurchgängigkeit war bei kleinen Hochwassereignissen somit nicht gegeben und musste verbessert werden.

Zur Gewährleistung bzw. Erhöhung der Geschiebedurchgängigkeit ist eine Reihe von flussbaulichen Massnahmen vorstellbar. Eine Anpassung an den Höhenlagen der Sohlschwellen oder des Einlaufbauwerks kam jedoch nicht infrage, da dieses System in vielerlei Hinsicht bereits sehr gut funktionierte. Deswegen wurde versucht, die Geschiebedurchgängigkeit durch flussbauliche Massnahmen in der Sihl zu verbessern. Zu diesem Zweck wurden Verlandungskörper in die Sohle eingebaut, wie sie in den Ganglinienversuchen nach grossen Hochwassereignissen beobachtet wurden (Bild 4). Ein Foto der Ausgangssohle mit eingebauten Verlandungskörpern ist in Bild 5 (oben rechts) abgebildet.

Auf der Ausgangssohle mit eingebauten Verlandungskörpern wurde anschliessend derselbe stationäre Gleichgewichtsversuch bei HQ₂ wiederholt, der auf der Ausgangssohle ohne Verlandungskörper zu grossen Auflandungen geführt hatte. Der Transport von laufendem Geschiebe verbesserte sich deutlich. Es dauerte kürzer, bis die ersten Körner über die Sohlschwellen transportiert wurden (20 h anstatt 120 h). Zudem wurde im Gleichgewichtszustand deutlich weniger laufendes Geschiebe abgelagert (2200 m³ anstatt 10000 m³). Diese Unterschiede im Geschiebetransport sind auch in Bild 5 und 6 zu erkennen. Nach dem Ganglinienver-

such mit Verlandungskörpern (Bild 5 unten rechts) ist eine deutlich kleinere Fläche mit laufendem Geschiebe bedeckt, wohingegen nach dem Versuch ohne Verlandungskörper auf der Ausgangssohle (Bild 5 unten links) das laufende Geschiebe über die gesamte Flussbreite abgelagert wurde.

Im Gegensatz zu den Laborversuchen ist davon auszugehen, dass in der Natur noch früher mit dem Weitertransport von Geschiebe gerechnet werden kann, da einerseits das laufende Geschiebe von Anfang an im gesamten Projektperimeter verteilt ist und nicht wie im Laborversuch am Modelleinlauf zugegeben wird und andererseits auch noch feineres Material vorhanden ist als das im Modell verwendete Einkornmaterial ($d=4$ cm).

Deshalb wird empfohlen, die Verlandungskörper bereits beim Bau des Einlaufbauwerks vorwegzunehmen. Da der Verlandungskörper oberstrom des Einlaufbauwerks nur selten (ab ca. HQ₁₀₀) überströmt wird, sollte er entsprechend von starkem Bewuchs freigehalten werden.

4.3 Schwemmholztransport

Am Einlaufbauwerk muss trotz des oberstrom liegenden Schwemmholzrechens Rütboden mit Schwemmholz gerechnet werden. Der Schwemmholzrechen Rütboden weist gemäss Modellversuchen eine Rückhalteeffizienz von ca. 95 Prozent auf (VAW, 2012; Hinkelammert-Zens et al., 2018; Hochstrasser et al., 2018). In der Sihl können bei einem Extremereignis bis zu $V_L = 12000 \text{ m}^3$ (Lockervolumen mit einem Auflockerungsgrad $a=4$) anfallen (Flussbau AG, 2012). Folglich würden davon $V_L = 600 \text{ m}^3$ (5 Prozent) den Schwemmholzrechen passieren und könnten unter

Umständen ins Einlaufbauwerk eingetragen werden oder an dessen Grobrechen verklauen. Grossre Verklausungen oder ein Eintrag sind allerdings zu vermeiden, weil sie den Restabfluss erhöhen resp. die Funktionsweise des Auslaufbauwerks beeinträchtigen können.

Im Modell wurde der Schwemmholztransport am Einlaufbauwerk bei stationären Abflüssen von HQ₃₀ und HQ₅₀₀ untersucht. Es wurde Stammholz und Astholz mit Stammlängen zwischen 1 und 10 m sowie Stammdurchmessern zwischen 0,1 und 0,4 m untersucht. Das HQ₃₀ ($Q_{Ges}=320 \text{ m}^3/\text{s}$) liegt nur wenig über dem Ansprungpunkt der Entlastung ($Q_{Ges}=250 \text{ m}^3/\text{s}$) und entspricht einem Szenario, bei dem die Wasserspiegellagen am Grobrechen und der Tauchwand entsprechend tief liegen. Dies begünstigt die Verklausung und den Eintrag von Schwemmholz. Im Gegensatz dazu liegen die Wasserspiegellagen bei einem HQ₅₀₀ entsprechend höher, was die Abweisung von Schwemmholz durch die Tauchwand fördert (vgl. Bild 1).

Die Versuche zeigten, dass vom zugegebenen Schwemmholz 10–15 Prozent (60–90 m³) bei HQ₃₀ resp. 5–10 Prozent (30–60 m³) bei HQ₅₀₀ den Grobrechen passieren und in das Einlaufbauwerk eingetragen werden. Beim eingetragenen Schwemmholz handelte es sich hauptsächlich um Astholz mit einer Stammlänge von 1 bis 5 m. Die maximale Länge eines eingetragenen Stammes betrug 7,5 m. Längere Stämme wurden nicht eingetragen, sondern verklauten am Grobrechen. Die eingetragenen Stämme wurden nach der Passage des Grobrechens direkt in den Stollen transportiert. Es ist deswegen damit zu rechnen, dass Schwemmholz ins Auslaufbauwerk des Entlastungsstollens gelangt. Entsprechende Untersuchungen wurden in den physikalischen Modellversuchen zum Auslaufbauwerk durchgeführt (Schroeder et al., 2021, in diesem Heft).

Die Verklausungen am Grobrechen lagen in derselben Größenordnung wie der Eintrag in den Stollen. Sie betragen bis zu 20 Prozent (120 m³) des zugegebenen Schwemmholzes bei HQ₃₀ resp. etwa 5 Prozent (30 m³) bei HQ₅₀₀. Auch hier zeigte sich die Wirkung der unterschiedlich hohen Wasserspiegellagen entlang des Grobrechens und der Tauchwand. Die Verklausungen am Grobrechen führten in den Versuchen nicht zu einer messbaren Beeinflussung der Trenncharakteristik, weil nur ein geringer Anteil der Rechenfläche verklaut war und zudem der Einfluss von Feinmaterial vernachlässigt wurde.

Um die Auswirkung einer dichten Verklebung auf die Trenncharakteristik zu untersuchen, wurde der Grobrechen in einem weiteren Versuch auf einer bestimmten Länge vollständig abgedichtet. Die künstliche Vollverklebung wurde in ihrer Länge und Lage am Grobrechen variiert. Die Messungen zeigten, dass eine Vollverklebung von einem Drittel der Rechenlänge die Trenncharakteristik nicht signifikant beeinflusst. Im Gegensatz dazu führten Vollverklebungen von zwei Dritteln der Rechenlänge zu einem deutlichen Anstieg des Restabflusses gegenüber dem unverkleusten Zustand. Im Dimensionierungsfall ($HQ_{500}=600\text{m}^3/\text{s}$) stieg der Restabfluss von $Q_R=270\text{m}^3/\text{s}$ im unverkleusten Zustand auf $Q_R=400\text{m}^3/\text{s}$ bei einer Vollverklebung von zwei Dritteln der Rechenlänge. Damit könnte das Freibord von 1m an den Sihl-Durchlässen des Hauptbahnhofs nicht mehr eingehalten werden. Folglich ist eine solche Teilverklebung am Einlaufbauwerk mit geeigneten Massnahmen (z.B. Schwemmholzentfernung durch Bagger im Ereignisfall) möglichst zu vermeiden.

4.4 Überlastszenarien und Bauzustand

Neben der Überprüfung der Hydraulik sowie des Geschiebe- und Schwemmholztransports wurden im Modell verschiedene Überlastszenarien und der Bauzustand untersucht. Als Überlastszenarien wurde ein Ganglinienversuch bei EHQ ($Q_{Ges}=700\text{m}^3/\text{s}$) sowie das Versagen eines Schlauchwehrs ('n-1') bei verschiedenen Gesamtabflüssen ($Q_{Ges}=300, 400, 600, 800\text{m}^3/\text{s}$) in der Sihl getestet. In beiden Überlastszenarien wurde generell ein gut-

mütiges Verhalten festgestellt. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass im Fall eines blockierten, d.h. nicht ablegbaren Schlauchwehrs bei $Q_{Ges}=800\text{m}^3/\text{s}$ der Restabfluss nicht signifikant ansteigt (von $Q_R=460\text{m}^3/\text{s}$ auf $Q_R=480\text{m}^3/\text{s}$, d.h. +4 Prozent). Dies liegt darin begründet, dass der Stollenabfluss durch die feste Drossel kontrolliert wird und das geschlossene Schlauchwehr die Entlastung nicht beeinflusst, weil die Wasserspiegellagen genügend hoch über dem Schlauchwehr liegen. Bei Abflüssen im Bereich des Dimensionierungsabflusses und kleiner ($Q_{Ges}\leq 600\text{m}^3/\text{s}$) liegen die Wasserspiegellagen allerdings weniger hoch, sodass ein geschlossenes Schlauchwehr die Entlastung verstärkt beeinflusst. Im Dimensionierungsfall ($Q_{Ges}=600\text{m}^3/\text{s}$) wird der Restabfluss durch ein blockiertes Schlauchwehr von $Q_R=270\text{m}^3/\text{s}$ auf $Q_R=320\text{m}^3/\text{s}$ (+19 Prozent) erhöht.

Im Bauzustand grenzt ein Kastenfangedamm die Baugrube von der Sihl ab. Der Kastenfangedamm ist auf ein Baustellenhochwasser von HQ_{100} dimensioniert. Diese für ein Baustellenhochwasser eher grosse Wiederkehrperiode ist u.a. darin begründet, dass der Stollenvortrieb mittels Tunnelbohrmaschine vom Einlaufbauwerk her fallend erfolgt und somit die Tunnelbohrmaschine bei Überströmen des Fangedamms unter Wasser gesetzt würde. Die Versuche haben gezeigt, dass bei einem HQ_{100} ein Freibord von 1 m am Fangedamm eingehalten wird. Die Oberkante des Fangedamms wird erst ab einem HQ_{300} erreicht. Somit ist die Baugrube des Entlastungsstollens Thalwil während des Baus hinreichend geschützt.

5. Fazit

Die Modellversuche zum Einlaufbauwerk des Entlastungsstollens Thalwil haben gezeigt, dass das in den Versuchen optimierte Bauwerk seine geplante Funktion erfüllt. Insbesondere wurden die Anforderungen an seine Trenncharakteristik erreicht. Auch bezüglich Geschiebe- und Schwemmholztransport sowie in verschiedenen Überlastszenarien und im Bauzustand konnte ein robustes Verhalten nachgewiesen werden. Für einen erfolgreichen Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat sind jedoch weitere Bauwerke unabdingbar, die in enger Wechselwirkung mit dem Einlaufbauwerk stehen (Stucki, 2021). Neben dem Stollen selbst und seinem Auslaufbauwerk gehört dazu in erster Linie der Schwemmholzrechen an der Sihl, der im Jahr 2012 in einem physikalischen Modell an der VAW untersucht und bereits erstellt wurde (VAW, 2012; Hinkelammert-Zens et al., 2018; Hochstrasser et al., 2018). Das Auslaufbauwerk des Entlastungsstollens wurde gleichzeitig zu den Versuchen am Einlaufbauwerk in einem physikalischen Modell an der VAW untersucht. Die in diesem Artikel beschriebenen Resultate aus den Versuchen zum Einlaufbauwerk flossen dabei direkt in die Optimierungen des Auslaufbauwerks ein (Schroeder et al., 2021, in diesem Heft).

Dank

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

Quellen:

- Flussbau AG (2010): Geschiebehaushaltstudie Sihl – Limmat. Technischer Bericht, Zürich
- Heller, V. (2011): Scale effects in physical hydraulic engineering models, Journal of Hydraulic Research, 49(3), 293–306, DOI: 10.1080/00221686.2011.578914
- Hinkelammert-Zens, F., Detert, M., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R. (2018): Hochwasserschutz Zürich - Drei Fragestellungen – Drei Modellversuche. Wasser, Energie, Luft 110(1), 33–42
- Hochstrasser, H., Schmocker, L., Bösch, M., Oplatka, M. (2018): Schwemmholzrechen für den Hochwasserschutz im unteren Sihltal. Wasser, Energie, Luft 110(1), 25–32
- IG Sihl-Entlastungsstollen (2017): Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat. Entlastungsstollen Thalwil. Technischer Bericht des Vorprojekts. 14.51330.31–710. Zürich

- Schroeder, A., Billeter, P., Boes, R., Keller, Y., Stucki, A., Lais, A. (2021): Entlastungsstollen Thalwil – Physikalische Modellversuche zum Auslaufbauwerk. Wasser, Energie, Luft 113(4), 213–222
- Stucki, A. (2021): Entlastungsstollen Thalwil – Stand und Ausblick. Wasser, Energie, Luft 113(3), 153–162
- VAW (2012): Schwemmholzrückhalt Sihl Standort Rütiboden. VAW-Bericht Nr. 4293. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH 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

Autoren:

- Andris Wyss, Prof. Dr. Robert Boes, Florian Hinkelammert-Zens, Dr. Volker Weitbrecht, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) ETH Zürich, Hönggerbergring 26, 8093 Zürich, www.vaw.ethz.ch, wyss@vaw.baug.ethz.ch
- Dr. Peter Billeter, Dr. Michael Müller, IUB Engineering AG, Belpstrasse 48, 3000 Bern
- Adrian Stucki, Baudirektion des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Walcheplatz 2, 8090 Zürich

PROJEKTPLUS

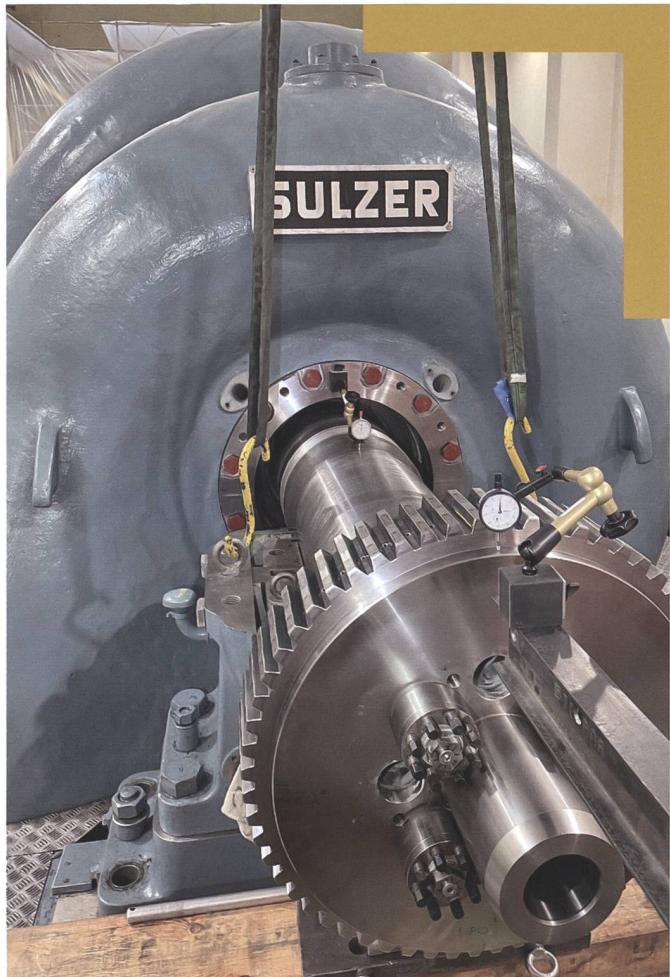


- Fachexperte Turbinenbau
- Abnahmebeauftragter
- Projektsupporter
- deutsch · französisch · englisch



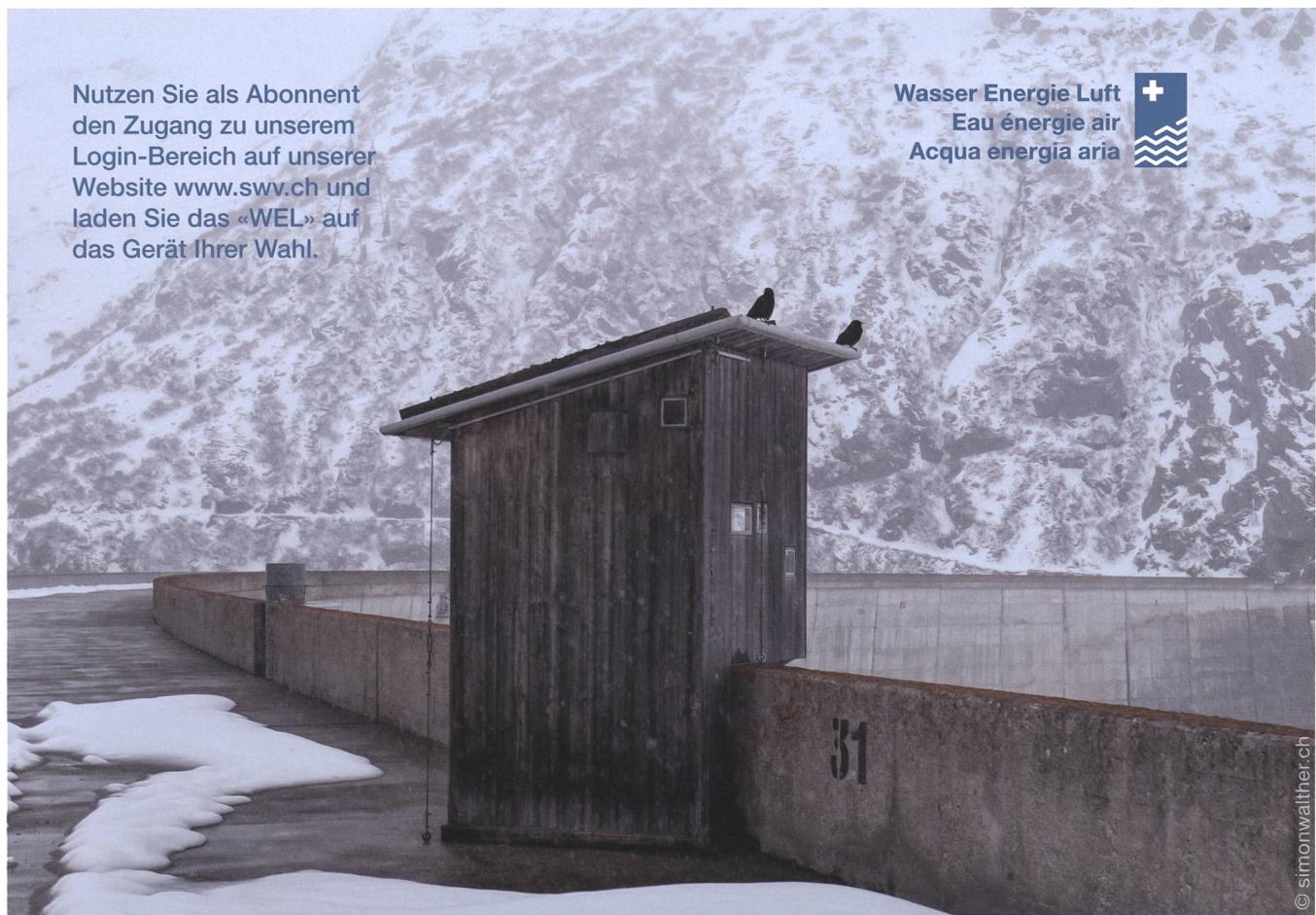
Thomas Blau
Maschinentechniker TS, CAS Hydro

PROJEKTPLUS AG
Rosenstrasse 2, CH-6010 Kriens
078 638 06 78
www.projekt-plus.ch



Nutzen Sie als Abonnent den Zugang zu unserem Login-Bereich auf unserer Website www.swv.ch und laden Sie das «WEL» auf das Gerät Ihrer Wahl.

Wasser Energie Luft
Eau énergie air
Acqua energia aria



© simonwalther.ch