Hochwasserschutz Zürich : drei Fragenstellungen - drei Modellversuche

Autor(en): **Hinkelammert-Zens, Florian / Detert, Martin / Schmocker, Lukas**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **110 (2018)**

Heft 1

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941573

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Hochwasserschutz Zürich – Drei Fragestellungen – Drei Modellversuche

Florian Hinkelammert-Zens, Martin Detert, Lukas Schmocker, Volker Weitbrecht, Robert Boes

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Projekt «Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat» des Kantons Zürich wurden an der VAW, ETH Zürich, drei verschiedene fluss- und wasserbauliche Fragestellungen anhand von hydraulischen Modellversuchen vertieft untersucht. Neben der Optimierung einer neuartigen Rechenanordnung zum Schwemmholzrückhalt in der Sihl, 15 km oberstrom des Stadtgebiets Zürich, wurde das Einlaufbauwerk für einen möglichen Entlastungsstollen von der Sihl in den Zürichsee im Detail analysiert. Eine der Kernfragen für sämtliche projektierte Hochwasserschutzmassnahmen war die exakte Kenntnis der Abflusskapazität der Sihldurchlässe am Hauptbahnhof Zürich im Zusammenspiel mit Sediment- und Schwemmholztransport. Trotz akribischer Vorarbeit durch die planenden Ingenieurbüros konnten in jedem der hydraulischen Modelle Prozesse beobachtet werden, die in dieser Form nicht erwartet wurden. Durch die Untersuchungen an der VAW konnten entscheidende Optimierungen hinsichtlich der Funktionalität der geplanten Bauwerke sowie eine deutliche Reduktion der Baukosten erzielt werden. Die Untersuchungen zeigen die Bedeutung von hydraulischen Modellversuchen bei der Untersuchung komplexer hydraulischer und flussbaulicher Fragestellungen.

Résumé

Dans le contexte de la protection contre les crues à Zurich, le laboratoire hydraulique VAW de l'EPF Zurich a étudié de multiples questions d'ingénierie fluviale et hydraulique à l'aide de trois modèles hydrauliques à l'échelle réduite. Dans une première étape, un aménagement novateur pour la rétention du bois flottant amené par la Sihl en cas de grandes crues, situé 15 km à l'amont de Zurich, a été optimisé expérimentalement. Ensuite, l'édifice d'entrée d'une galerie de dérivation de crue, projetée au même site et menant de la Sihl au lac de Zurich, fut analysé en détail. Une des questions cruciales pour la protection du centre-ville contre les crues était la connaissance exacte de la capacité de débit des cinq passages de la Sihl en-dessous de la gare centrale de Zurich, sous considération du transport solide et du bois flottant. Même avec les travaux préliminaires méticuleux des bureaux d'ingénieurs impliqués, des processus inattendus ont pu être observés dans chaque modèle hydraulique. Par les études de la VAW, des optimisations essentielles pour le fonctionnement des édifices planifiés ainsi qu'une réduction des coûts de construction ont pu être obtenus. Les investigations de la VAW montrent l'importance des modèles hydrauliques pour les études de questions d'ingénierie fluviale et hydraulique de haute complexité.

1. Einleitung

Dieser Artikel wird in der vorliegenden Ausgabe gemeinsam mit dem Beitrag «Schwemmholzrechen für den Hochwasserschutz im unteren Sihltal» von *Heinz Hochstrasser et al.* publiziert, in welchem ausführlich auf die Hintergründe der Hochwassergefahr im unteren Sihltal und der Stadt Zürich eingegangen wird. In dieser Arbeit wird daher auf entsprechende Ausführungen verzichtet und der Fokus auf die Beiträge der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich zur Lösung der Hochwasserproblematik im Stadtgebiet Zürich gesetzt. In den Jahren 2010 bis 2015 wurden zu diesem Zweck an der VAW im Auftrag des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) drei grossmassstäbliche hydraulische Modelle errichtet und betrieben. Die entsprechenden Arbeiten der VAW werden im Folgenden vorgestellt.

2. Hochwasserschutz Zürich / Schlüsselstelle Hauptbahnhof

Der Hauptbahnhof Zürich (HB Zürich) nimmt eine Schlüsselposition für die Abflusskapazität der Sihl im Stadtgebiet Zürich ein. Dieser wird von der Sihl in einem Zwischengeschoss in fünf Durchlässen unterquert, wodurch der Abflussquerschnitt durch die Durchlassöffnungen sowie die umliegende Infrastruktur massiv beschränkt wird *(Bild 1)*. Diese bauliche Situation begünstigt Verklausungen durch Schwemmholz sowie anderes Treibgut und kann zu einer raschen Reduktion der Abflusskapazität bei Materialablagerungen in den Durchlässen führen.

Das Hochwasserereignis vom 22. und 23. August 2005 entsprach im Stadt-

Bild 1. Ansicht des Bereichs oberstrom HB Zürich beim Hochwasser im August 2005 (mod. nach AWEL).

gebiet Zürich mit einem Spitzenabfluss von 280–300 m^3/s knapp einem HQ_{30} (entsprechend Gefahrenkartierung *Stadt Zürich, Basler & Hofmann*, 2008) und verdeutlichte die im Hochwasserschutz bestehenden Defizite. Bei diesem seit Fertigstellung des Sihlsees im Jahr 1937 grössten Hochwasser in der Stadt Zürich wurden die in diversen Studien berechneten Wasserspiegellagen teils deutlich überschritten. Im sensiblen Gebiet ober- und unterstrom der Sihldurchlässe beim HB Zürich lagen die Hochwasserspuren um bis zu 0.4 m über den Berechnungen (*Basler & Hofmann*, 2006). Im August 2005 wurde in den Sihldurchlässen bereits bei einem HQ_{30} das erforderliche Freibord von 1 m unterschritten – es bestand somit dringender Handlungsbedarf, um bei zukünftigen grösseren Hochwasserereignissen weitreichende Schäden zu verhindern.

Basierend auf diesen Erfahrungen, startete der Kanton Zürich unter Leitung des AWEL ein umfangreiches Projekt zum Hochwasserschutz im Einzugsgebiet Sihl–Zürichsee–Limmat (*Kanton Zürich*, 2012). Dieses Projekt verfolgte mehrere Strategien für die langfristige Verbesserung der Hochwassersituation, welche ausführlich in einem Synthesebericht des AWEL zusammengestellt sind (*AWEL*, 2017). Zwei Konzepte – der «Entlastungsstollen Thalwil» sowie die «Kombilösung Energie» – wurden parallel auf Stufe Vorprojekt hydraulisch und bautechnisch geprüft.

In Zusammenhang mit dem Gesamtprojekt zum Hochwasserschutz Zürich wurden an der VAW anhand von drei hydraulischen Modellen flussbauliche und hydraulische Fragestellungen vertieft untersucht. Die Reihenfolge der Modellversuche der VAW orientierte sich dabei an der Dringlichkeit der Fragestellung bzw. am Bearbeitungsstand des Gesamtprojekts.

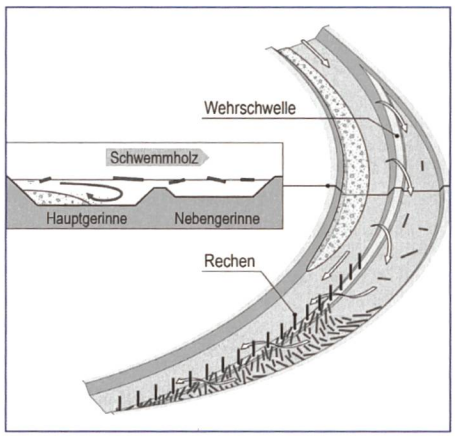

Bild 2. Prinzipskizze Rückhaltekonzept im Nebengerinne (Schmocker und Weitbrecht, 2013).

3. Schwemmholzrückhalt Rütiboden

Die Sihl verfügt über ein hohes Schwemmholzpotenzial und führt bereits bei kleinen und mittleren Hochwasserereignissen beträchtliche Mengen Schwemmholz mit (siehe Artikel von *Hochstrasser et al.* in dieser Ausgabe). Insbesondere die Sihldurchlässe am HB Zürich sind im Hochwasserfall stark gefährdet, da es durch Verklausungen zu massivem Rückstau oberstrom des HB Zürich und innerstädtischen Überschwemmungen kommen kann.

Eine der ersten Massnahmen des Gesamtprojekts zum Hochwasserschutz Zürich war daher die Projektierung einer geeigneten Massnahme, um die grossen Schwemmholzmengen der Sihl zu beherrschen. Ein Variantenstudium von AWEL, dem Ingenieurbüro Basler & Hofmann AG und der VAW ergab einen 15 km oberhalb des Stadtgebiets am Standort Rütiboden angeordneten Parallelrechen als optimale Lösung. Dieser Lösungsvorschlag orientierte sich unter anderem an den Erkenntnissen zum Schwemmholzrückhalt an der Kleinen Emme bei Ettisbühl (*Tamagni et al.*, 2010).

3.1 Konzept und Zielsetzung

Der Schwemmholzrückhalt mittels Parallelrechen bedingt eine ausgeprägte Kurvensituation, wie sie in der bestehenden Rechtskurve der Sihl am Rütiboden gegeben ist. Aufgrund der Sekundarströmungen in der Kurve wird das Schwemmholz auf die Kurvenaussenseite transportiert und dort in das Nebengerinne und den Rückhalteraum eingetragen *(Bild 2)*. Eine Wehrschwelle trennt dabei das Hauptgerinne der Sihl vom Rückhalteraum und definiert den Anspringpunkt des Nebengerinnes. Der Schwemmholzrechen wird parallel zum Gerinne der Sihl angeordnet und hält das Schwemmholz im Nebenarm der Sihl zurück. Aufgrund der Sekundärströmungen und der erhöhten Lage der Wehrschwelle wird das Geschiebe weiterhin ausschliesslich im Hauptgerinne transportiert. Eine am Ende der Wehrschwelle angeordnete Sohlschwelle verhindert Eintiefungen der Sohle, welche den Anspringpunkt verändern und die Funktion des Bauwerks gefährden könnten *(Bild 3)*. Es sei darauf hingewiesen, dass eine solche Trennung von Schwemmholz und Geschiebe durch die Wirkung der Sekundärströmung nur bei geringen Sohlenneigungen bzw. geringen Froude-Zahlen funktioniert.

Dieses innovative Konzept des Schwemmholzrückhalts im Nebengerinne wurde bis dato in ähnlicher Grössenordnung nur beim Schwemmholzrückhalt in Ettisbühl (*Tamagni et al.*, 2010) angewendet. Es bestanden somit geringe Erfahrungen bezüglich der zu erwartenden Prozesse und der Funktionsfähigkeit des Bauwerks. Zur Überprüfung und Optimierung des Konzepts wurde die VAW im Dezember 2010 durch das AWEL mit der Durchführung hydraulischer Modellversuche beauftragt. Die Zielsetzungen sind in *Hochstrasser et al.* (diese Ausgabe) beschrieben.

3.2 Experimenteller Aufbau

Für die Untersuchung wurde ein hydraulisches Modell im Massstab 1:40 gewählt (Modellähnlichkeit nach Froude). Der Mo-

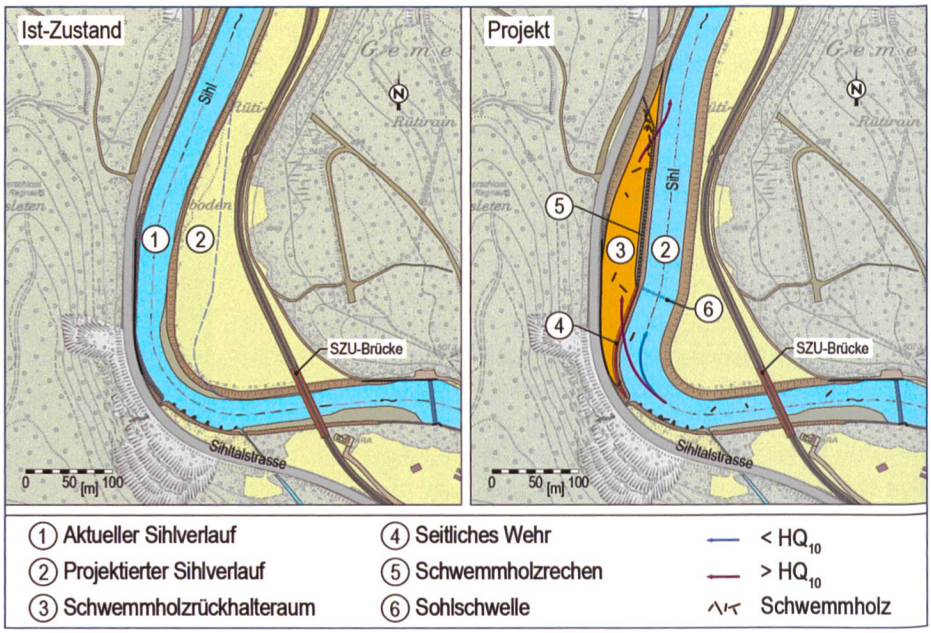

Bild 3. Ursprünglicher Verlauf der Sihl am Standort Rütiboden sowie Projektübersicht des Schwemmholzrückhalts (Schmocker et al., 2014).

dellperimeter umfasste rund 1.2 km Fliessstrecke der Sihl. Die Sohle wurde bis auf die Tiefe des Molassefelshorizonts mit beweglichem Sediment ausgeführt, während die Ufer fest nachgebildet wurden. Ein Foto des hydraulischen Modells ist in *Hochstrasser et al.* (diese Ausgabe) zu finden.

Das Schwemmholzpotenzial der Sihl wurde im Rahmen einer Studie der *Flussbau AG* (2009) ausführlich untersucht. Die darin ausgewiesenen Schwemmholzklassen wurden im hydraulischen Modell mit geometrisch skaliertem Schnittholz nachgebildet und entsprechend eingefärbt *(Bild 4, Tabelle 1)*. Feinholz ist von grosser Bedeutung für den Verlegungsgrad von Verklausungen, kann in hydraulischen Modellen aufgrund der Skalierung jedoch nur bedingt nachgebildet werden. Um die Robustheit des Systems auch bei einem extremen Verlegungsgrad nachzuweisen, wurden die Auswirkungen von Feinholz durch eine vollständige Abdichtung des Rechens untersucht.

Für die Simulation des zeitlichen Verlaufs von Hochwasserszenarien wurde der Modellbetrieb vollständig über einen Steuerungscomputer automatisiert. Die Zuflussmenge am oberen Modellrand sowie der Wasserstand am unteren Modellrand wurden durch elektronische Schieber geregelt, welche eine präzise Simulation von Zuflussganglinien und den entsprechenden Wasserständen am unteren Modellrand ermöglichten. Die Geschiebezugabe erfolgte über eine automatische Beschickungsmaschine, welche entsprechend definierter Ganglinien kontinuierlich Modellsediment zugab. Das Auslaufbecken am unteren Modellrand wurde mit einem getauchten Geschiebekorb mit automatischer Wägung ausgestattet. Vor Versuchsbeginn sowie nach Versuchsende wurden die Sohlenlagen im Modell an definierten Querprofilen mittels Laserabstandssensoren vermessen. Aus der Differenz dieser Messungen wurden in weiterer Folge die Veränderungen der Sohlenlagen bestimmt. Durch deren Gegenüberstellung mit den zugegebenen Geschiebemengen sowie dem Austrag am Modellende konnten für jeden Versuch präzise Geschiebebilanzen erstellt werden. Die Wasserspiegellagen wurden mittels Ultraschallsensoren laufend aufgezeichnet. Das Modellschwemmholz wurde manuell zugegeben und für jeden Versuch bilanziert.

Das Modell des Schwemmholzrückhalts Rütiboden wurde durch die Gegenüberstellung der Modellmessungen mit den Ergebnissen von hydronumerischen 1D-(HEC-RAS) und 2D-Simulationen (BASEMENT) sowie den Hochwasserspuren des Ereignisses von August 2005 kalibriert. Ein während des Modellbetriebs auftretendes Sihl-Hochwasser im Juni 2011 erlaubte eine zusätzliche Validierung des Modells.

3.3 Ergebnisse

Mit dem ursprünglichen Projektentwurf aus dem Jahr 2010 konnten im hydraulischen Modell 60 % des beim HQ_{300}-Ganglinienversuch anfallenden Schwemmholzes zurückgehalten werden. Die generelle Funktionstüchtigkeit des Konzepts war gegeben, die Schwemmholz-Rückhalterate konnte im hydraulischen Modell durch diverse Optimierungen jedoch deutlich erhöht werden. Folgende Parameter bzw. Bestandteile des hydraulischen Modells wurden in drei Schritten variiert und optimiert (siehe auch *Bild 3*):

(1) Anpassung der Linienführung in der Rechtskurve, Verschmälerung des Hauptgerinnes der Sihl; Verkleinerung des Schwemmholzrückhalteraums, Verkürzung der Wehrschwelle. Schwemmholzrückhalt bei HQ_{300}-Ganglinie: 65 %.

(2) Absenkung der Wehrschwelle, um den Schwemmholzrückhalt bei kleinen Abflüssen zu verbessern; weitere Optimierung der Gerinnebreite entlang des Rechens und Anpassungen der Uferlinienführung. Schwemmholzrückhalt bei HQ_{300}-Ganglinie: 85 %.

(3) Nutzung eines rechtsufrigen Vorlands als «Leitbauwerk» für das Schwemmholz; Ausführung der Wehrschwelle als Absturz, um Schwemmholzablagerungen zu verhindern. Schwemmholzrückhalt bei HQ_{30} und HQ_{300}-Ganglinie sowie im Überlastfall EHQ: 95 %.

Diese iterativen Optimierungen erlaubten der VAW und ihren Projektpartnern, das bestehende Konzept zu einem robusten System weiterzuentwickeln. Dank den durchgeführten Anpassungen konnte der Schwemmholzrückhalt für alle getesteten Hochwasserszenarien inklusive des Überlastfalls auf ca. 95 % gesteigert werden.

Die seitliche Wehrschwelle springt ca. ab einem HQ_1 an, wobei effektiv ab einem HQ_{10} Schwemmholz in den Rückhalteraum geleitet wird. Durch die damit verbundene Ausleitung von grossen Wassermengen in den Rückhalteraum nimmt die Geschiebetransportkapazität im Hauptgerinne der Sihl ab. Dadurch entsteht ein nicht zu vermeidender Zielkonflikt zwischen maximalem Schwemmholzrückhalt und möglichst ungestörtem Geschiebetransport. Im Hauptgerinne der Sihl am Rütiboden ist somit bei Hochwasserereignissen mit Geschiebeablagerungen zu rechnen. Folglich ist in diesem Bereich eine entsprechende Geschiebebewirtschaftung vorzusehen.

Die im hydraulischen Modell entwickelten Anpassungen der Linienführung und weiterer Bauteile des Schwemmholzrückhalts wurden von den Projektpartnern für die Ausführungsplanung des Bauprojekts übernommen. Durch die optimierte Linienführung konnten das für den Bau

Bild 4. Modellschwemmholz in 5 Klassen (Massstab 1:40).

	Astholz 40%		Stammholz 60%		
Klasse	A	B	C	D	E
Volumenanteil	16%	24%	24%	24%	12%
Länge Natur [m]	1 - 2.5	2.5 - 5	5 - 6	6 - 7.5	7.5 - 10
Länge Modell [mm]	25 - 62.5	62.5 - 125	125 - 150	150 - 187.5	187.5 - 250
Ø Natur [m]	0.1 - 0.3		0.3 - 0.4		
Ø Modell [mm]	2.5 - 7.5		7.5 - 10		

Tabelle 1. Schwemmholzklassen in Natur und Modellmassstab 1:40.

notwendige Aushubvolumen deutlich verkleinert und konnten somit Kosten eingespart werden. Der Bau des Schwemmholzrechens wurde im Mai 2017 abgeschlossen. Für Informationen zur Ausführung des Bauprojekts wird auf den Beitrag von *Hochstrasser et al.* in dieser Ausgabe verwiesen.

4. Einlaufbauwerk Entlastungsstollen

Bis Sommer 2017 wurden für den Hochwasserschutz der Stadt Zürich die beiden Varianten «Entlastungsstollen Thalwil» und «Kombilösung Energie» durch den Kanton Zürich parallel auf Stufe Vorprojekt weiterverfolgt. Die Ingenieur-Unternehmung Bern AG (IUB) wurde im Zuge dieser Vorarbeiten mit einer Machbarkeitsstudie zur technischen Durchführbarkeit eines Entlastungsstollens beauftragt. Der Entwurf von IUB sieht einen Hochwasserentlastungsstollen vom Sihltal bis zum Zürichsee im Bereich Thalwil vor (Gesamtlänge ca. 2.1 km). Dessen Einlaufbauwerk wurde in der Aussenseite einer Linkskurve angeordnet, welche sich direkt unterstrom des Schwemmholzrechens beim Rütiboden befindet. Auf diese Weise wird die Wirkung des Schwemmholzrechens ideal genützt und die Gefahr des Eintrags von Schwemmholz in den Entlastungsstollen stark reduziert. Durch die Sekundärströmungen in der Linkskurve kann des Weiteren der Geschiebeeintrag in den Stollen minimiert werden. Der projektierte Standort des Einlaufbauwerks lag innerhalb des Perimeters der Modellversuche zum Schwemmholzrückhalt Rütiboden (Kap. 3). Somit bot sich die Gelegenheit, die projektierte Anordnung des Einlaufbauwerks für den Entlastungsstollen im hydraulischen Modell des Schwemmholzrückhalts zu integrieren und die Annahmen der Vorprojektierung zu überprüfen.

4.1 Konzept und Zielsetzung

Der Entlastungsstollen soll bei Extremhochwasserereignissen eine Teilwassermenge aus der Sihl in den Zürichsee ableiten, um Ausuferungen im Stadtgebiet Zürich zu unterbinden und gleichzeitig die Retentionswirkung des Zürichsees auszunutzen. Das Einlaufbauwerk des Entlastungsstollens wird rechtsufrig als seitliche Entnahme über eine gekrümmte Wehrschwelle mit anschliessendem Sammelbecken ausgebildet. Mittels eines Tafelschützes wird das Wasser im Sammelbecken aufgestaut, um im Stollen schiessende Abflussverhältnisse sicherzustellen *(Bild 5)*. Der Anspringpunkt der Wehrschwelle ist derart gewählt, dass während des Bemessungsereignisses die vorgesehene Wassermenge entlastet, der Geschiebehaushalt in der Sihl jedoch möglichst wenig beeinträchtigt wird. Entlang dem Einlaufbauwerk wird die Gerinnebreite der Sihl verringert, um den Geschiebetransport auch bei Anspringen der Entlastung möglichst aufrechtzuhalten *(Bild 6)*. Das von der Sihl transportierte Schwemmholz, welches den oberstrom liegenden Schwemmholzrechen noch passiert, wird mittels Tauchwand am Einlaufbauwerk vorbeigeleitet.

Die Zielwerte für die gewünschten Anspring- und Entlastungsmengen wurden durch das AWEL festgelegt: Aus Hochwasserschutzgründen sollten bei einem Bemessungsabfluss von 550 m^3/s rund 300 m^3/s durch den Stollen entlastet werden. Aus morphologischen und ökologischen Gesichtspunkten wurde ein Anspringpunkt im Bereich von 150 m^3/s angesetzt. Aufgrund der erforderlichen Robustheit im Überlastfall wurde ein ungesteuertes Bauwerk gewählt, bei welchem die Schützenstellung während Hochwasserereignissen nicht verändert werden muss. Folgende Fragestellungen wurden im hydraulischen Modell untersucht:

- Kann die Lage des Einlaufbauwerks optimiert werden?
- Sind Anspringpunkt und Trenncharakteristik der Wehrschwelle korrekt gewählt?
- Ist die Höhe der Tauchwand ausreichend?
- Wie kann die Geometrie von Wehrschwelle, Sammelrinne und Einlaufbauwerk optimiert werden?
- Wie wirkt sich das Einlaufbauwerk auf den Geschiebetransport aus?
- Kommt es zu Rückkopplungen zwischen Einlaufbauwerk und oberstrom gelegenem Schwemmholzrechen?
- Wie sind die Abflussverhältnisse im Sammelbecken, beim Übergang in den Stollen sowie am Beginn des Entlastungsstollens?

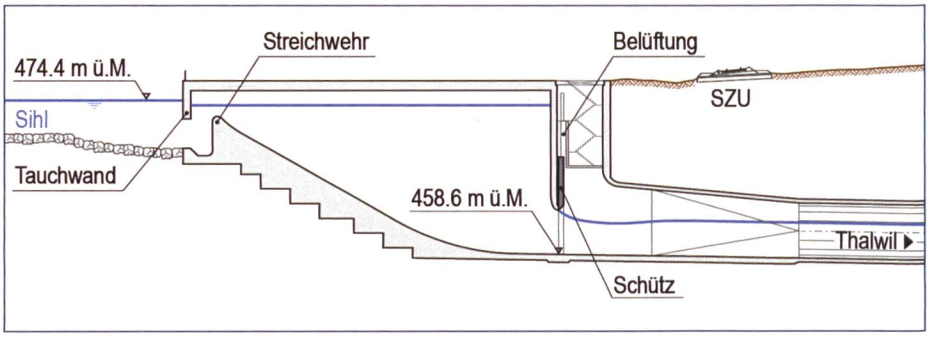

Bild 5. Längenschnitt des Einlaufbauwerks (Planskizze Vorprojektierung IUB, Januar 2011).

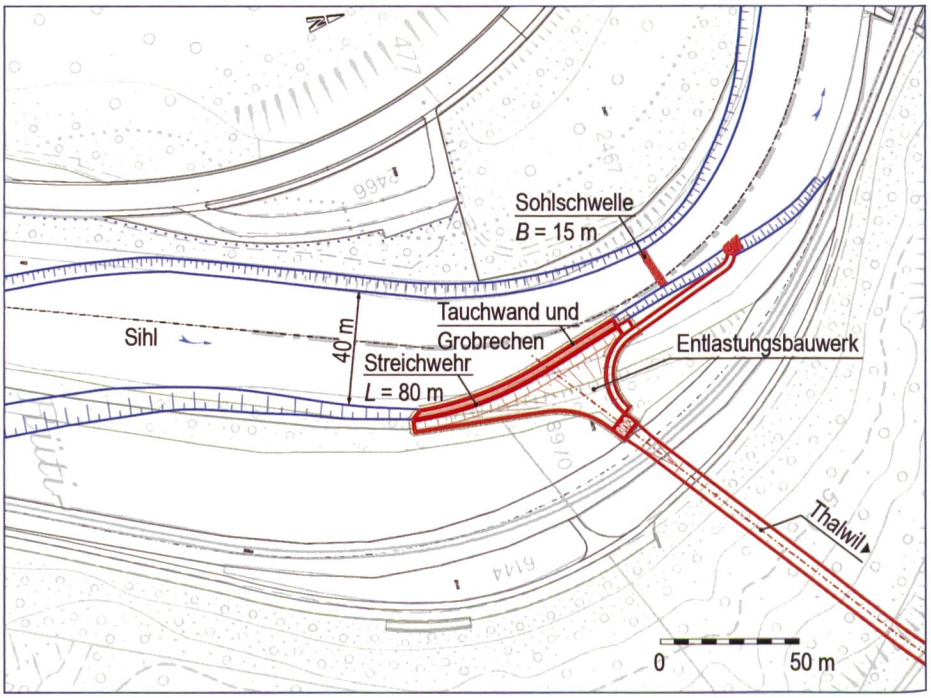

Bild 6. Situation des projektierten Einlaufbauwerks (Planskizze Vorprojektierung IUB, Januar 2011).

4.2 Experimenteller Aufbau

Für die Untersuchung des geplanten Einlaufbauwerks konnte das an der VAW bereits bestehende hydraulische Modell des Standorts Rütiboden im Massstab 1:40 genutzt werden (Kap. 3.2). Ein Foto des vollständigen hydraulischen Modells ist in *Hochstrasser et al.* (diese Ausgabe) zu finden. Die zugrunde liegenden Annahmen bezüglich Modellsediment und Modellschwemmholz wurden für die Untersuchung des Einlaufbauwerks beibehalten. Der untere Bereich des Modells wurde entsprechend der Vorprojektierung von IUB umgebaut und um das Einlaufbauwerk sowie einen Abschnitt des Entlastungsstollens (Länge in Natur 100 m) erweitert *(Bild 7)*.

Die Messtechnik im Modell wurde entsprechend der zu untersuchenden Fragestellungen angepasst: Der Abfluss über die Wehrschwelle und durch den Stollen wurde in einem Auslaufbecken gesammelt und an einem zusätzlichen Messwehr kontinuierlich bestimmt. Die Wasserspiegellagen vor dem Einlaufbauwerk wurden durch zusätzliche Ultraschallsensoren kontinuierlich aufgezeichnet. Der Geschiebeaustrag aus der Sihl in das Einlaufbauwerk wurde durch manuelle Wägung ermittelt, während die Abflusstiefe bzw. Druckhöhe im Stollen mit Piezometerdrucksonden bestimmt wurde.

4.3 Ergebnisse

Die Vorversuche im hydraulischen Modell bestätigten die generelle Funktionsfähigkeit des Einlaufbauwerks und zeigten, dass die hydraulischen Verhältnisse beim Stolleneinlauf von jenen beim Schwemmholzrechen (Kap. 3.1) entkoppelt sind. In der Vorprojektierung lag das Einlaufbauwerk am Beginn der Linkskurve, in einem Bereich, in welchem die Sekundärströmungen noch nicht ausreichend ausgeprägt waren. Infolgedessen wurden grosse Mengen Geschiebe über das Streichwehr in den Stollen transportiert. Die Lage des Einlaufbauwerks wurde daraufhin in den Scheitelpunkt der Kurve verlegt. Des Weiteren zeigten die Vorversuche, dass ohne Installation einer Tauchwand praktisch sämtliches Schwemmholz, das den Rechen passiert, in den Stollen eingetragen würde.

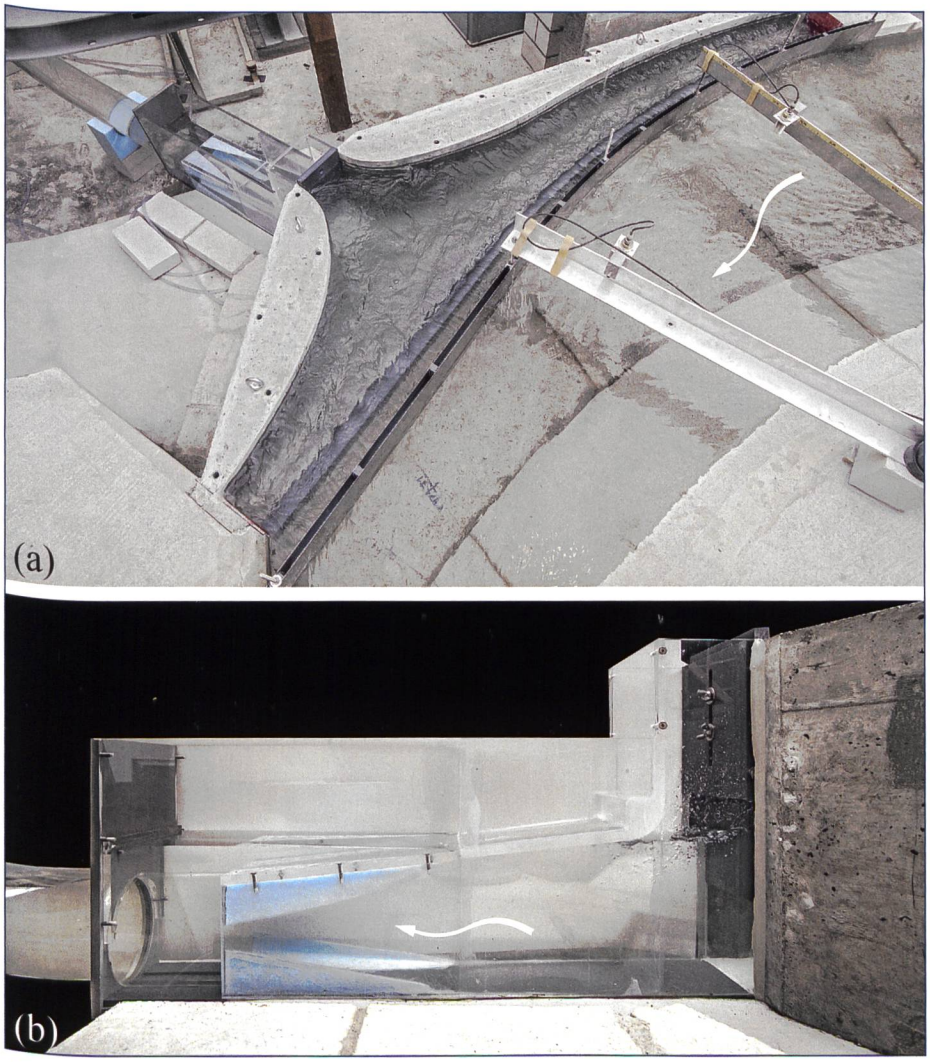

Bild 7. (a) Ansicht Einlaufbauwerk und (b) Längenschnitt Stollen im hydraulischen Modell (Massstab 1:40).

Zur Untersuchung der Trenncharakteristik des Bauwerks und dessen Entlastungskapazität wurden EHQ-Ganglinienversuche mit einem Spitzenabfluss von 550 m^3/s durchgeführt, mit sowie ohne Schwemmholzzugabe. Um die engen Zielsetzungen bezüglich Entlastungskapazität und Anspringpunkt (Kap. 4.1) zu erreichen, wurden im Modell folgende Parameter variiert: (1) Höhe Wehrschwelle, (2) Länge Wehrschwelle, (3) Längsneigung Wehrschwelle, (4) Höhe Sohlschwelle, (5) Breite Sohlschwelle und (6) Linienführung der Sihl im Bereich des Einlaufbauwerks. Im Modell wurden vier bauliche Varianten getestet, um die Zielvorgaben zu erreichen.

Die optimale Variante zeigte für EHQ einen Entlastungsabfluss von 320 m^3/s (Zielwert 300 m^3/s) bei einem Anspringpunkt von 135–170 m^3/s (Zielwert 150 m^3/s). Die Sicherstellung dieses hohen Anspringpunkts verlangt eine 130 m lange Wehrschwelle, um den Entlastungsabfluss sicher abführen zu können. In der aktuellen Planung (IUB 2017) ist vorgesehen, durch die Verwendung eines geregelten Entlastungsorgans den Anspringpunkt auf ca. 250 m^3/s anzuheben, um den Geschiebetrieb bei kleineren Hochwasserereignissen möglichst wenig zu beeinflussen.

Durch die Einengung der Sihl im Bereich der Sohlschwelle *(Bild 6)* auf 15 m und den damit verbundenen Rückstau wird die Weiterleitung des Geschiebes bei einem EHQ auf ca. 50 % reduziert. Wie bereits beim Schwemmholzrückhalt festgestellt wurde (Kap. 3.3), ist auch beim Standort des Einlaufbauwerks nach grösseren Hochwasserereignissen mit Geschiebeablagerungen zu rechnen. Diese müssen in einem entsprechenden Geschiebebewirtschaftungskonzept berücksichtigt werden.

Die Versuche zur Entlastungskapazität zeigten, dass der projektierte Stollendurchmesser von 5.6 m nicht ausreichte, um die geforderten 300 m^3/s im Freispiegelabfluss abzuleiten. Im Übergang von Rechteck- auf Kreisquerschnitt kam es zum Zuschlagen des Stollens, im gesamten Stollen herrschte Druckabfluss. Dies bewirkte einen Aufstau in der Sammelrinne und infolgedessen einen unvollkommenen Überfall über die Wehrschwelle. Der Stollendurchmesser wurde daher von 5.6 auf 6.4 m erhöht. Zudem wurden der Übergang von Rechteck- auf Kreisprofil über eine längere Strecke ausgeführt und die Höhenverhältnisse nach der Schütze angepasst. Nach diesen Massnahmen herrscht auch bei einem Maximalabfluss

von 320 m^3/s noch Freispiegelabfluss im Stollen.

Die Modellversuche zum Entlastungsstollen zeigen deutlich, dass auch bei Projekten mit sehr detaillierter Planung in hydraulischen Modellen eine Vielzahl von Prozessen auftreten, welche in Handrechnungen oder numerischen Simulationen nicht berücksichtigt werden können oder schlicht nicht erkannt werden. Durch eine Vielzahl an Iterationen und baulichen Anpassungen im hydraulischen Modell konnte eine Lösung gefunden werden, die gegenüber der ursprünglichen Planung wesentliche, teils sicherheitsrelevante Verbesserungen aufweist.

5. Abflusskapazität am HB Zürich

Die Sihldurchlässe unter dem HB Zürich sind eine massgebende Schlüsselstelle für den Hochwasserschutz der Stadt Zürich. Die exakte Bestimmung der maximalen Abflusskapazität der Durchlässe, unter Berücksichtigung von Schwemmholz- und Sedimenttransport, ist eine zentrale Fragestellung für die Festlegung des Ausbaugrads der Sihl im Stadtgebiet sowie für die Planung zukünftiger Hochwasserschutzmassnahmen.

Die Gleishalle des HB Zürich wird von der Sihl in einem Zwischengeschoss auf einer Länge von 190 m in fünf Durchlässen (mittlere lichte Weite 12 m × 3 m) gequert. Das Flussbett der Sihl liegt unterhalb der 16 Hauptgleise des HB Zürich, jedoch oberhalb der unterirdischen Bahnhöfe Museumstrasse und Löwenstrasse *(Bild 8)*. Die Decke der Durchlässe setzt sich aus den Gleisbrücken, den dazwischenliegenden Bahnsteigen sowie deren Widerlager zusammen und ist von der Sihl frei zugänglich. Diese Struktur führt zu einem komplizierten geometrischen Aufbau mit einer Vielzahl an Tiefpunkten, welche für Verklausungen höchst anfällig sind. Bis ins Jahr 2006 verfügten die Sihldurchlässe über eine durchgängige Kiessohle («Zustand 2006», *Bild 8*).

Die umfangreichen Bauarbeiten für die Erstellung der Durchmesserlinie Zürich (DML) in den Jahren 2005–2015 führten zu massgebenden Veränderungen der baulichen Situation in den Sihldurchlässen. Die Erstellung von unterirdischen Bahnanlagen bedingte die temporäre Schliessung von bis zu drei Durchlässen. Für die Aufrechterhaltung der Abflusskapazität bei Hochwasserereignissen wurde die Sohle in allen Durchlässen um ca. 0.6 m abgetieft und mit Betonplatten versiegelt («Zustand 2014», *Bild 8*). In den Bauauflagen des AWEL wurde nach Abschluss der Bauarbeiten die Wiederherstellung des Zustands 2006 vorgesehen.

Im Rahmen der DML-Projektierung waren die hydraulischen und geschiebetechnischen Verhältnisse in den Sihldurchlässen Gegenstand diverser Studien und Untersuchungen. Diese Grundlagenarbeiten verdeutlichten nochmals die Beschränkung der Abflusskapazität in den Durchlässen und veranlassten das AWEL, die VAW im Juli 2012 mit der Durchführung von hydraulischen Modellversuchen zu beauftragen.

5.1 Zielsetzung

Die Untersuchungen der VAW wurden für den baulichen Zustand vor der Erstellung der DML («Zustand 2006») und nach dem Abschluss der Bauarbeiten («Zustand 2014») durchgeführt. Folgende Aspekte wurden im hydraulischen Modell untersucht:

- Wie hoch ist die Abflusskapazität der fünf Sihldurchlässe für die baulichen Zustände vor/nach Erstellung der DML?
- Wie ist das Systemverhalten bei gros-

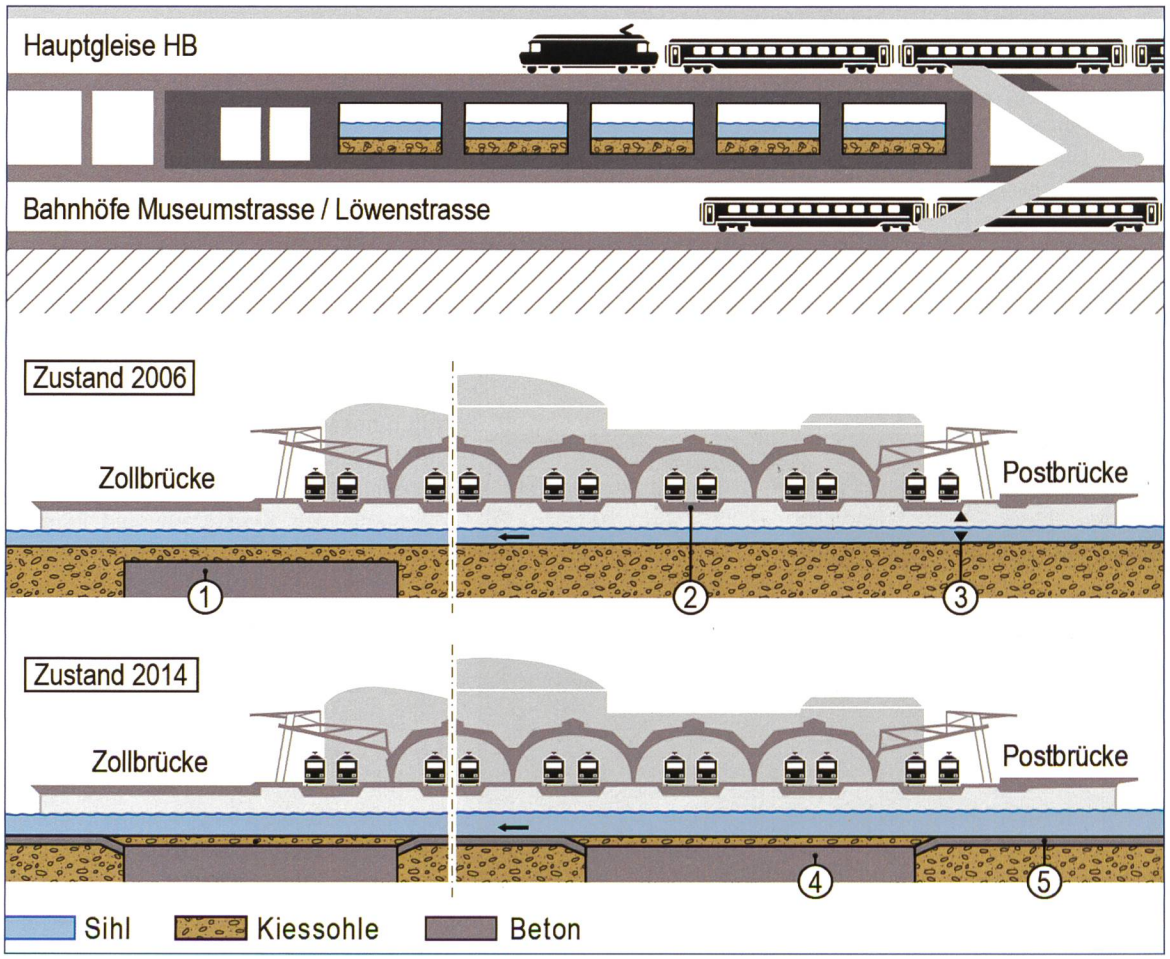

Bild 8. Stilisierte Quer- und Längenschnitte durch die Sihldurchlässe in den Zuständen 2006 und 2014; (1) Tiefbahnhof Museumsstrasse, (2) Gleisbrücken und Bahnsteige, (3) kritischer Querschnitt im Einlaufbereich, (4) Tiefbahnhof Löwenstrasse, (5) Sohlversiegelung (mod. nach SBB).

sen und extremen Hochwasserereignissen (HQ_{100}, HQ_{300}, EHQ)?
- Sind die Freiborde ausreichend?
- Welche Sohlveränderungen sind bei grossen und extremen Hochwasserereignissen zu erwarten?
- Wie hoch ist die Verklausungsgefahr eines oder mehrerer Durchlässe?
- Gibt es Optimierungsmöglichkeiten für die Gestaltung der Durchlässe nach Abschluss der DML-Arbeiten? Ist ein Rückbau zum Zustand 2006 sinnvoll?

5.2 Hybride Modellierung

Die Grundlagenanalyse zu Beginn der Modellplanung zeigte, dass die Abflussverhältnisse beim Zusammenfluss von Sihl und Limmat entscheidend für die hydraulischen Verhältnisse in den Sihldurchlässen sind. Knapp oberstrom des Zusammenflusses befindet sich im Gerinne der Limmat das Lettenwehr, welches den Wasserstand des Zürichsees regelt und als Ausleitungsbauwerk für das Kraftwerk Letten dient. Durch diese Anordnung haben die Wehrsteuerung sowie die Abflussmenge in der Restwasserstrecke der Limmat einen direkten Einfluss auf das Abflussgeschehen der Sihl sowie die Wasserspiegellagen in den Sihldurchlässen *(Bild 9)*. Aufgrund des benötigten Modellmassstabs und der Platzverhältnisse im Labor der VAW konnte dieser Bereich nicht in das hydraulische Modell integriert werden. Für die Bestimmung der Wasserspiegellagen als untere Randbedingung für die Modellversuche wurde daher ein hybrider Modellansatz aus Laborexperiment und Computersimulation gewählt.

Das hydraulische Modell wurde im Massstab 1:30 (Modellähnlichkeit nach Froude) erstellt und bildete ca. 900 m Fliessstrecke der Sihl ab (*Bild 9, Bild 10*). Der oberstrom des HB Zürich einmündende Schanzengraben wurde im Modell nachgebildet und ist in Natur mit einer ca. 1 m hohen Mauer vom Hauptgerinne der Sihl getrennt. Das Modellende befand sich ca. 50 m flussauf des Zusammenflusses Sihl / Limmat.

Parallel zum hydraulischen Modell wurde mit der Software BASEMENT ein hydronumerisches 2D-Modell erstellt, welches den Perimeter des hydraulischen Modells umfasste und jeweils 900 m Fliessstrecke oberstrom sowie unterstrom zusätzlich abbildete. Sämtliche Szenarien wurden zuerst im numerischen Modell grossräumig untersucht und daraufhin im hydraulischen Modell im Detail nachgebildet. Dies war insbesondere für die korrekte Nachbildung der Verhältnisse beim Zusammenfluss Sihl/Lim-

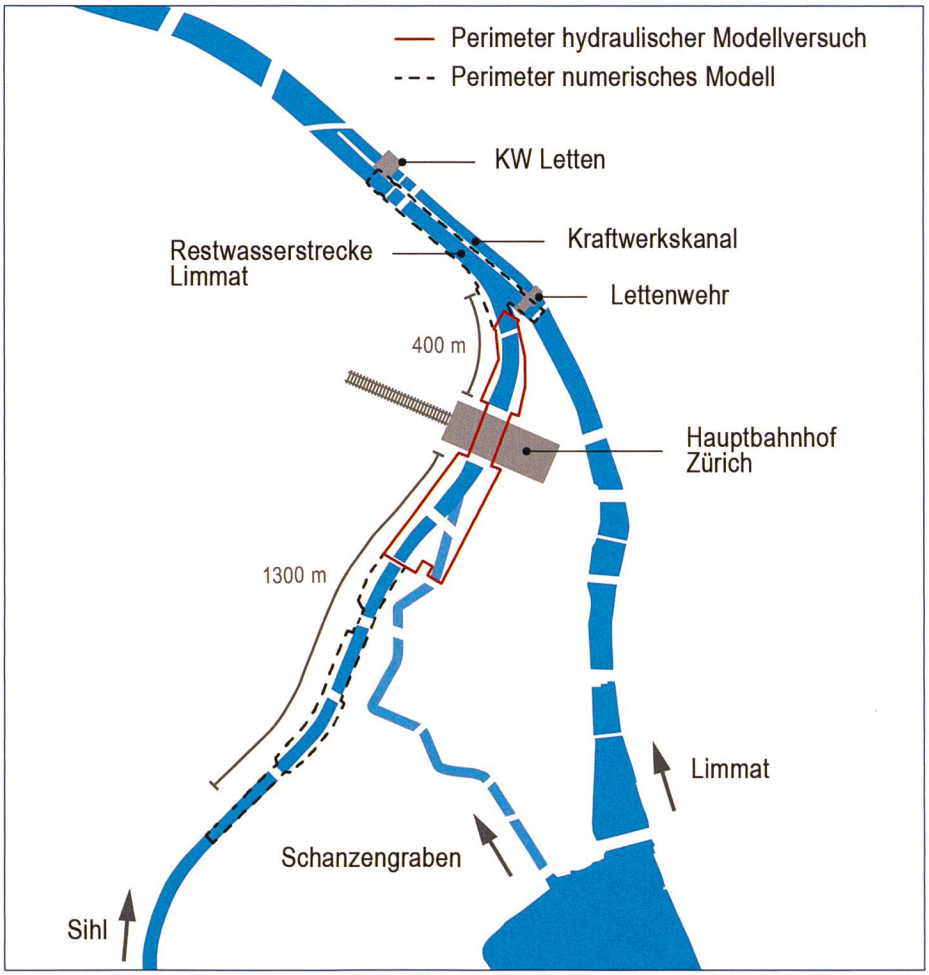

Bild 9. Untersuchungsgebiet Modellversuch Sihldurchlässe HB Zürich.

Bild 10. Ansicht des hydraulischen Modells der Sihldurchlässe (Massstab 1:30), Blick in Fliessrichtung.

mat notwendig: Die im numerischen Modell für die jeweiligen Szenarien ermittelten Wasserspiegellagen wurden in das hydraulische Modell übertragen und mittels eines eingestauten Auslaufbeckens mit automatisch geregeltem Wasserstand eingestellt.

Im hydraulischen Modell wurden die Sihldurchlässe im Bereich des HB Zürich für einen besseren optischen Zugang durch eine Plexiglaskonstruktion in Kombination mit Betonelementen nachgebildet (*Bild 11*, *Bild 12*). Zusätzlich wurde dieser Bereich auf einer erhöhten Betonplatte errichtet, sodass präzise und kontinuierliche Wasserspiegelmessungen über kommunizierende Röhren durchgeführt werden konnten. Aufgrund des grossen öffentlichen Interesses beinhaltete das Modell eine Vielzahl an geometrischen Details, welche neben der Abbildung der hydraulischen Wirksamkeit auch aufgrund des Wiedererkennungseffekts übernommen wurden *(Bild 12)*. Das Hauptgerinne der Sihl war mit beweglicher Sohle ausgestattet, während die Ufer im Modell befestigt wurden.

Die Kalibrierung des hydraulischen Modells erfolgte anhand von Hochwasserereignissen der Jahre 2005/2006/2007 und in Gegenüberstellung mit den Ergebnissen von entsprechenden numerischen Simulationen.

5.3 Ergebnisse

Die hybride Modellierung der VAW zeigte eindrücklich, dass Angaben zur Abflusskapazität der Sihldurchlässe nur in Kombination mit der Angabe eines entsprechenden Abflusses in der Limmat eindeutig zu interpretieren sind. Das derzeitige Wehrreglement des Lettenwehrs beschränkt den Abfluss in der Limmat unterstrom des Zusammenflusses mit der Sihl auf max. 600 m^3/s *(Bild 9)*. Bei Kenntnis des Sihlabflusses kann der entsprechende Abflusswert der Limmat auf dieser Basis berechnet werden.

Als maximale Abflusskapazität Q_{max} wurde der Abflusszustand festgelegt, bei dem ein gleichmässiges Anschlagen des Wasserspiegels an der Decke der Sihldurchlässe zu beobachten ist und es noch nicht zu Druckabfluss kommt. Dieser Zustand wurde bei einem Sihl-Spitzenabfluss von 490 m^3/s in Kombination mit einem Limmatabfluss von 190 m^3/s erreicht («Q_{max} 490/190»). Die Untersuchungen der VAW zeigten, dass dieser Wert überraschenderweise für den Zustand der Sihldurchlässe vor und nach dem Bau der DML gilt.

Im Zustand 2006 kam es aufgrund der allgemein höheren Sohlenlagen erwartungsgemäss im Einlaufbereich der Durchlässe zum ersten Anschlagen des Wasserspiegels. Die Absenkung und Versiegelung der Sohle im Zustand 2014 führte dennoch zu keiner signifikanten Erhöhung der Abflusskapazität: Aufgrund des dominierenden Rückstaus der Limmat lag die Schwachstelle im Zustand 2014 im unteren Drittel der Sihldurchlässe; in diesem Bereich wurde als erstes ein Anschlagen des Wasserspiegels festgestellt. Bei Berücksichtigung eines Freibords von 1 m liegt die Abflusskapazität bei einem Sihlabfluss von 270 m^3/s, in Gegenüberstellung mit einem Limmatabfluss von 205 m^3/s.

Die Untersuchungen des Verklausungsrisikos zeigten, dass grosse Mengen Schwemmholz bei der Trennmauer zwischen Sihl und Schanzengraben abgelagert werden und das Verklausungsrisiko der angrenzenden Durchlässe erhöhen *(Bild 13)*. Unterhalb von Verklausungskörpern werden im Zustand 2006 in der natürlichen Flusssohle tiefe Kolke gebildet, welche die Abflusskapazität trotz der Verklausung aufrechterhalten. Die Schwemmholzansammlungen führen zu höheren Wasserspiegeln im Einlaufbereich und lokalem, temporärem Einstau der Gleisbrücken 3/4 sowie 5/6. Die Sohlversiegelung im Zustand 2014 verhindert die Kolkbildung unter den Verklausungskörpern und ist in diesem Fall kontraproduktiv.

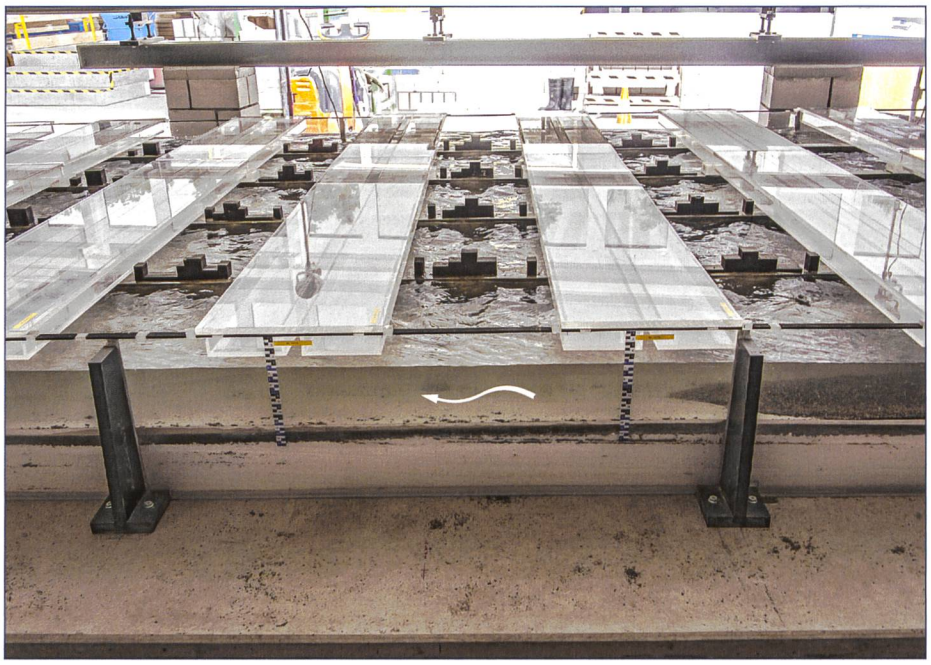

Bild 11. Sihldurchlässe mit Nachbildungen der Gleisbrücken und Widerlager im hydraulischen Modell (Massstab 1:30).

Bild 12. Sitzstufen bei Sigi-Feigel-Terrasse im hydraulischen Modell (Massstab 1:30).

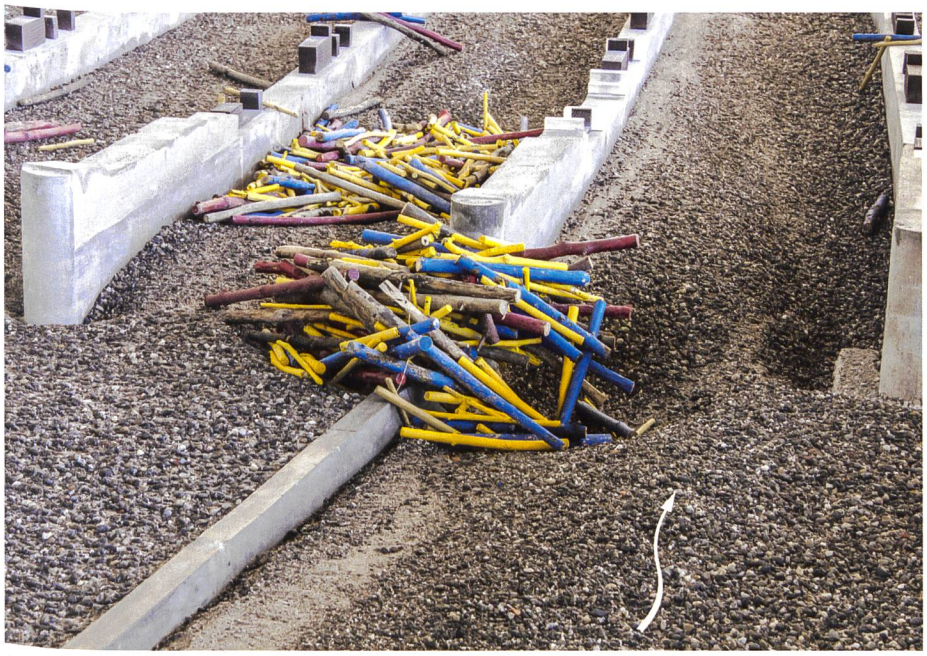

Bild 13. Schwemmholzablagerungen vor Sihldurchlässen im hydraulischen Modell (Massstab 1:30).

Bild 14. Auflandungen unterstrom HB Zürich im hydraulischen Modell (Massstab 1:30).

Der Bereich oberstrom des HB Zürich stellt aufgrund der vorhandenen Gerinnegeometrie eine natürliche Auflandungsstrecke dar. Durch den Rückstau der Limmat im Hochwasserfall wird dieser Effekt verstärkt, und es kommt auch flussab des HB Zürich zu Auflandungen – dies erklärt auch das Vorhandensein grosser Schotterinseln in diesem Bereich bis zum Jahr 2006 *(Bild 14)*. In den Sihldurchlässen wurde die Bildung von Transportkörpern beobachtet, deren Fronten sich mit gleichbleibender Mächtigkeit in Fliessrichtung bewegen. Dieser Prozess wurde in beiden Modellzuständen beobachtet, ist im Zustand 2014 aufgrund der tieferen Sohllagen jedoch stärker ausgeprägt. Aufgrund des Rückstaus konnte bei keinem der untersuchten Hochwasserszenarien signifikanter Geschiebetransport aus der Sihl in die Limmat beobachtet werden.

Vor dem Hintergrund des vom AWEL geforderten Rückbaus der Sihl nach Erstellung der DML wurde von der VAW eine Bestvariante für die zukünftige Gestaltung der Sihl entwickelt. Es wird die Wiederherstellung der natürlichen Kiessohle mit den Sohllagen von 2006 empfohlen, da die Sohlversiegelung in den Durchlässen keine massgebende Erhöhung der Abflusskapazität bringt. Aufgrund der Kolkbildung bei Extremereignissen im Einlaufbereich der Sihldurchlässe sind lokale Schutzmassnahmen, z. B. durch einen Blockteppich, vorzusehen. Die Entfernung der Trennmauer zwischen Sihl und Schanzengraben führt oberstrom des HB Zürich zu einer dynamischeren und natürlicheren Sohlentwicklung.

6. Fazit und Ausblick

Die an der VAW zwischen 2010 und 2015 durchgeführten grossmassstäblichen hydraulischen Modellversuche waren entscheidende Grundlagen für die weitere Planung zur Verbesserung des Hochwasserschutzes der Stadt Zürich. In den Untersuchungen zum Schwemmholzrückhalt Sihl sowie dem Einlaufbauwerk und Entlastungstollen Thalwil konnten die Konzepte der Projektpartner entscheidend optimiert werden. So wurde der Schwemmholzrückhalt durch einen Rechen im Nebenschluss von 60 auf 95 % gesteigert, während beim Einlaufbauwerk beispielweise die unzureichende Dimensionierung des Entlastungsstollens erkannt wurde. Die Untersuchung zweier Bauzustände bei den Sihldurchlässen am HB Zürich zeigte eine Vielzahl von Prozessen, welche im Rahmen der Projektierungsarbeiten nur zum Teil erkannt wurden. Auf dieser Basis konnte eine Bestvariante für die zukünftige Gestaltung der Sihl im Bereich des HB Zürich entwickelt werden, welche ab Frühjahr 2018 schrittweise umgesetzt wird.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass hydraulische Modellversuche auch heutzutage, trotz grossen Fortschritten in der hydronumerischen Modellierung, unverzichtbare Hilfsmittel für die Projektierung und Dimensionierung von komplexen fluss- und wasserbaulichen Projekten sind. So ist beispielweise die Simulation von morphologischen Prozessen weiterhin eine anspruchsvolle Aufgabe, welche nicht ausschliesslich in numerischen Modellen bearbeitet werden kann. Die numerische Nachbildung von Schwemmholztransport und Verklausungsprozessen ist nach wie vor Gegenstand der Forschung. Aufgrund der hohen Komplexität im Zusammenspiel zwischen morphologischen Prozessen und Schwemmholzverklausungen sind jedoch in den nächsten Jahren keine Lösungen zu erwarten, welche in der ingenieurtechnischen Praxis einen hydraulischen Modellversuch ersetzen können. Computermodelle liefern für den Betrieb hydraulischer Modelle wertvolle Eingangs- und Vergleichsdaten. Durch diesen hybriden Modellierungsansatz können Aussage- und Prognosefähigkeit im hydraulischen Modellwesen signifikant gesteigert werden.

Im Oktober 2017 wurde vom Zürcher Regierungsrat entschieden, das Konzept «Entlastungsstollen Thalwil» auszuführen und die «Kombilösung Energie» nicht weiter zu verfolgen (*Kanton Zürich*, 2017). Die VAW wurde in weiterer Folge vom AWEL mit Detailuntersuchungen der Bauprojekte für die Ein- und Auslaufbauwerke des Entlastungsstollens beauftragt. Die Untersuchung des Einlaufbauwerks wird im Massstab 1:30 erfolgen, jene des Auslaufbauwerks am Zürichsee in Thalwil im Massstab 1:16.9.

Literatur

AWEL (2017). Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat, Synthesebericht zum Konzeptentscheid «Entlastungsstollen Thalwil». Verfügbar unter: https://awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/wasser/hochwasserschutz/hochwasserschutz_zuerich/langfristige_massnahmen/weiteres-vorgehen.html (abgerufen am 07.02.2018).

Basler & Hofmann AG (2006). Sihl Hochwasser August 2005, Dokumentation. Im Auftrag des AWEL, Stand: 10. April 2006.

Basler & Hofmann AG (2008). Gefahrenkartierung Hochwasser Stadt Zürich, Technischer Bericht. Im Auftrag des AWEL, Stand: 24. November 2008.

Basler & Hofmann AG (2010). Schwemmholzrückhalt Sihl – Pflichtenheft VAW-Modellversuche. Im Auftrag des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL), Zürich.

Flussbau AG (2009). Schwemmholzstudie Sihl. Bericht im Auftrag des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL).

Flussbau AG (2010). Geschiebehaushaltsstudie Sihl–Limmat. Bericht im Auftrag der Kantone Zürich und Aargau, des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich und der Limmatkraftwerke AG.

Hochstrasser et al. (2018). Schwemmholzrechen für den Hochwasserschutz im unteren Sihltal. «Wasser Energie Luft» 110 (1), 25–32 .

IUB (2017). Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat, Entlastungsstollen Thalwil, Technischer Bericht. Im Auftrag des AWEL, Stand: 2. Mai 2017.

Kanton Zürich (2012). Wasserbau, Hochwasserschutz Sihl–Zürichsee–Limmat (Ausgabenbewilligung). Regierungsratsbeschluss 925.

Kanton Zürich (2017). Wasserbau, Hochwasserschutz Sihl, Zürichsee, Limmat (Konzeptentscheid Entlastungsstollen Thalwil; zusätzliche Ausgabe für Projektierung und teilweise vorgezogene Ausführungsplanung). Regierungsratsbeschluss 943.

Marti, C., Oplatka, M., Scapozza, C. (2014). Hochwasserschutz Sihl–Zürichsee–Limmat, Tagungsband «Wasserbau und Flussbau im Alpenraum», VAW-Mitteilung 227/228 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich.

Schmocker, L., Schmidt, M., Hochstrasser, H., Detert, M., Weitbrecht, V. (2014). Schwemmholzrückhalt Sihl. Tagungsband «Wasserbau und Flussbau im Alpenraum», VAW-Mitteilung 227/228 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich.

Schmocker, L., Detert M., Marti C., Huber A., Billeter P., Weitbrecht V. (2014). Hochwasserentlastungsstollen Sihl. Tagungsband «Wasserbau und Flussbau im Alpenraum», VAW-Mitteilung 227/228 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich.

Schmocker, L. und *Weitbrecht, V.* (2013). Driftwood: Risk analysis and engineering measures. Journal of Hydraulic Engineering, 139 (7), 683–695.

Tamagni, S., Weitbrecht, V., Müller, U., Hunziker, R., Wyss, H., Kolb, R., Baumann, W. (2010). Schwemmholzrückhalt Ettisbühl/Malters. «Wasser Energie Luft» 102 (4), 269–274.

VAW (2012). Schwemmholzrückhalt Sihl Standort Rütiboden. Bericht Nr. 4293. VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht).

VAW (2013). Einlaufbauwerk Entlastungsstollen Sihl Standort Rütiboden. Bericht Nr. 4293/2. VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht).

VAW (2015). Sihldurchlässe Hauptbahnhof Zürich. Bericht Nr. 4308. VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht).

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Ingenieurbüros Basler & Hofmann AG (B&H) sowie Ingenieur-Unternehmung Bern AG (IUB) für die gute und zielgerichtete Zusammenarbeit. Die präsentierten Forschungsarbeiten wurden im Wesentlichen durch das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich finanziert; für die Untersuchung der Abflusskapazität der Sihldurchlässe am Hauptbahnhof Zürich gilt der Dank auch den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB).

Anschrift der Verfasser

Florian Hinkelammert-Zens, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich,
hinkelammert-zens@vaw.baug.ethz.ch
Dr. *Martin Detert*, VAW, ETH Zürich
detert@vaw.baug.ethz.ch
Dr. *Lukas Schmocker*, VAW, ETH Zürich
schmocker@vaw.baug.ethz.ch
Dr. *Volker Weitbrecht*, VAW, ETH Zürich
weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. *Robert Boes*, VAW, ETH Zürich
boes@vaw.baug.ethz.ch