

# Flood protection at Zurich main station: physical model experiments

## Hochwasserschutz Hauptbahnhof Zürich: Hydraulische Modellversuche

Florian Hinkelammert, Msc.<sup>1</sup>; Dr. Volker Weitbrecht<sup>2</sup>; Prof. Dr. Robert M. Boes<sup>2</sup>

### ABSTRACT

Essential parts of downtown Zurich are located on the alluvial fan of the Sihl River. Due to high sediment loads and considerable amounts of driftwood during extreme flood events, the potential damage for a PMF is estimated at about 5 billion CHF. The main bottleneck concerning the discharge capacity is located at Zurich's main railway station, where the Sihl River crosses the station in an intermediate floor through five culverts. For the successful design of flood control measures, reliable data on the discharge capacity with the influence of driftwood and sediment transport are essential. To this end, VAW of ETH Zurich performed physical model investigations at a scale of 1:30. In parallel, a numerical 2D-model was operated. The experiments showed that the consideration of backwater effects triggered by the confluence of Sihl River and Limmat River 400 m downstream of Zurich main station is crucial. Therefore, the discharge of the Limmat River has to be considered for the specification of the discharge capacity of the five culverts.

### ZUSAMMENFASSUNG

Grosse Bereiche der Stadt Zürich liegen auf dem Schwemmkegel des Voralpenflusses Sihl und sind stark hochwassergefährdet. Aufgrund der starken Verbauung wird das Schadenspotential bei EHQ auf bis zu 5 Milliarden Franken geschätzt. Die massgebende Schlüsselstelle für die Abflusskapazität der Sihl im Stadtgebiet ist die Position der Gleishalle des Hauptbahnhofs Zürich, welche von der Sihl in einem Zwischengeschoss in fünf Durchlässen durchquert wird. Diese Situation begünstigt Verkläuerungen durch Schwemmholz und anderes Treibgut und kann zu einer Reduktion der Abflusskapazität bei Materialablagerungen in den Durchlässen führen. Der Ausbau des Hochwasserschutzes im Stadtgebiet bedingt eine möglichst exakte Kenntnis der Abflusskapazität der Sihldurchlässe. Hybride Untersuchungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich mittels eines physikalischen Modells im Massstab 1:30 sowie einem hydronumerischen 2D-Modell zeigten, dass der Einfluss des 400 m flussab gelegenen Zusammenflusses von Sihl und Limmat massgebenden Abfluss auf die Wasserspiegellagen in den Sihldurchlässen hat. Angaben zur

1 VAW, ETHZ, Zürich, SWITZERLAND, hinkelammert@vaw.baug.ethz.ch

2 VAW, ETHZ

Abflusskapazität der Sihl können daher nur in Zusammenhang mit dem jeweiligen Limmat-Abfluss eindeutig interpretiert werden.

## KEYWORDS

Flood protection; physical model; hybrid modelling; debris flows; sediment transport

## HINTERGRUND

Grosse Teile des Zürcher Stadtgebiets wurden auf dem natürlichen Schwemmkegel der Sihl errichtet und sind bei ausserordentlichen Hochwasserereignissen stark überflutungsgefährdet. Aufgrund des stetigen Ausbaus dieser Gebiete im Zuge der Stadtentwicklung wird das Schadenspotential bei einer Abflussspitze von 550 m<sup>3</sup>/s auf bis zu 5 Milliarden Franken geschätzt (Marti et al. 2014). Eine Schlüsselstelle für die Abflusskapazität der Sihl im Stadtgebiet nimmt der Hauptbahnhof Zürich („HB Zürich“) ein, dessen Gleishalle von der Sihl in einem Zwischengeschoss mit fünf Durchlässen durchquert wird.

Das Hochwasserereignis von August 2005 entsprach im Stadtgebiet Zürich mit einem Sihl-Spitzenabfluss von 280 m<sup>3</sup>/s knapp einem HQ<sub>30</sub>. Aufgrund einer günstigen Wetterlage kam es zu keinen Überflutungen im Stadtgebiet, das Ereignis verdeutlichte jedoch die im Hochwasserschutz bestehenden Defizite. Aufgrund des dringenden Handlungsbedarfs starteten die Kantone Zürich und Schwyz unter Leitung des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) ein umfangreiches Projekt zum Hochwasserschutz im Einzugsgebiet Sihl – Zürichsee - Limmat (Kanton Zürich 2012). Neben der Umsetzung diverser kurz- und mittelfristiger Massnahmen in den Jahren 2005 bis 2012 werden bis 2017 zwei Konzepte für den langfristigen Hochwasserschutz geprüft. Variante 1 sieht die Errichtung eines Entlastungstollens vor, welcher ab einem Abfluss von 150 m<sup>3</sup>/s die Hochwasserspitzen der Sihl in den Zürichsee ableiten würde. Die 2. Variante „Kombilösung Energie“ beinhaltet den Ausbau des bestehenden Pumpspeicherkraftwerks Etzelwerk am Sihlsee und vereint Aspekte des Hochwasserschutzes und der Energieproduktion (Marti et al. 2014).

## ZIELSETZUNG

Beide Varianten für den langfristigen Hochwasserschutz bedingen eine möglichst exakte Kenntnis der Abflusskapazität der Sihldurchlässe im Bereich des HB Zürich. Numerische Simulationen stossen bei solchen Fragestellungen an ihre Grenzen, vor allem die Prognose der Sohllagen sowie die Untersuchung von Verklausungsszenarien sind nicht in ausreichender Genauigkeit möglich. Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich wurde durch das AWEL sowie die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) im Juli 2012 mit der Durchführung von hydraulischen Modellversuchen beauftragt. Die Resultate dienen unter anderem der Festlegung des Ausbaugrads der Sihl in der Stadt Zürich sowie der Massnahmenplanung im Überlastfall (Marti et al. 2014).

Folgende Aspekte wurden untersucht:

- Abflusskapazität der Sihldurchlässe mit sowie ohne gesetzliche Freiborde („Q<sub>max</sub>“)

- Systemverhalten bei Hochwasserszenarien entsprechend der Gefahrenkartierung ( $HQ_{100}$ ,  $HQ_{300}$ , EHQ)
- Geschiebetransport mit Variantenuntersuchungen zu Sohlaufbau in Sihldurchlässen und Gerinne
- Verklausungsgefahr durch Schwemmholz
- Optimierungsmöglichkeiten für zukünftige Gestaltung der Durchlässe

Für die hydraulischen Modellversuche wurden die Szenarien der Gefahrenkartierung („GK“, Basler & Hofmann 2008) als Grundlage verwendet. Die Spitzenabflüsse, Hydrographen sowie Abflusskombinationen wurden dementsprechend gewählt. Für die Bestimmung der maximalen Wasserspiegel wurde ein Szenario gewählt, bei dem einer der 5 Sihldurchlässe vollständig mit Schwemmholz verklaut ist. Während der Durchführung der Modellversuche wurden zusätzliche Untersuchungen zur Hydrologie des Einzugsgebiets abgeschlossen (Scherrer 2013), welche zu einer Erhöhung der Spitzenabflüsse der verschiedenen Jährlichkeiten führte. Diese höheren statistischen Abflusswerte wurden für die Hauptszenarien im hydraulischen Modell nicht berücksichtigt, jedoch im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Auf das Hauptziel der Modellversuche, die Bestimmung der maximalen Abflusskapazität, hatte die Erhöhung der statistischen Hochwasserwerte keinen Einfluss.

### UNTERSUCHUNGSGEBIET SIHLDURCHLÄSSE

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich vom Pegel Sihlhölzli an der Sihl bis zum Pegel Unterhard an der Limmat (Abbildung 1).

Die Gleishalle des HB Zürich liegt 400 m flussauf des Zusammenflusses von Sihl und Limmat und wird von der Sihl in einem Zwischengeschoss durch 5 Durchlässe auf einer Länge von ca. 190 m gequert (Masse pro Durchlass: lichte Weite ca. 12 m, lichte Höhe ca. 3 m, Länge ca. 190 m). Für die Gewährleistung des Geschiebetransports in der Sihl ist diese vom flussauf des HB Zürich einmündenden Schanzengraben mittels einer ca. 1 m hohen, ca. 200 m langen Mauer getrennt. Bei mittleren Abflüssen fliesst die Sihl durch die linken drei Durchlässe unter der Gleishalle, während der Schanzengraben die rechten zwei Durchlässe für sich beansprucht. Erst ab einem Sihl-Abfluss von ca.  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  wird die Trennmauer überströmt, wodurch der Sihl bei Hochwasserereignissen der gesamte Abflussquerschnitt zur Verfügung steht.

Knapp oberstrom des Zusammenflusses von Sihl und Limmat befindet sich im Gerinne der Limmat das Lettenwehr, welches den Wasserstand des Zürichsees regelt und als Ausleitungsbauwerk für das Kraftwerk Letten dient. Aufgrund dieser Anordnung haben die Wehrsteuerung sowie die Abflussmenge in der Restwasserstrecke (RWS) der Limmat einen direkten Einfluss auf das Abflussgeschehen der Sihl sowie die Wasserspiegellagen in den Sihldurchlässen. Das derzeitige Wehrreglement beschränkt den Abfluss in der Limmat unterstrom des Zusammenflusses auf max.  $600 \text{ m}^3/\text{s}$ , wobei bei EHQ von einem Gesamtabfluss von  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  ausgegangen wird.

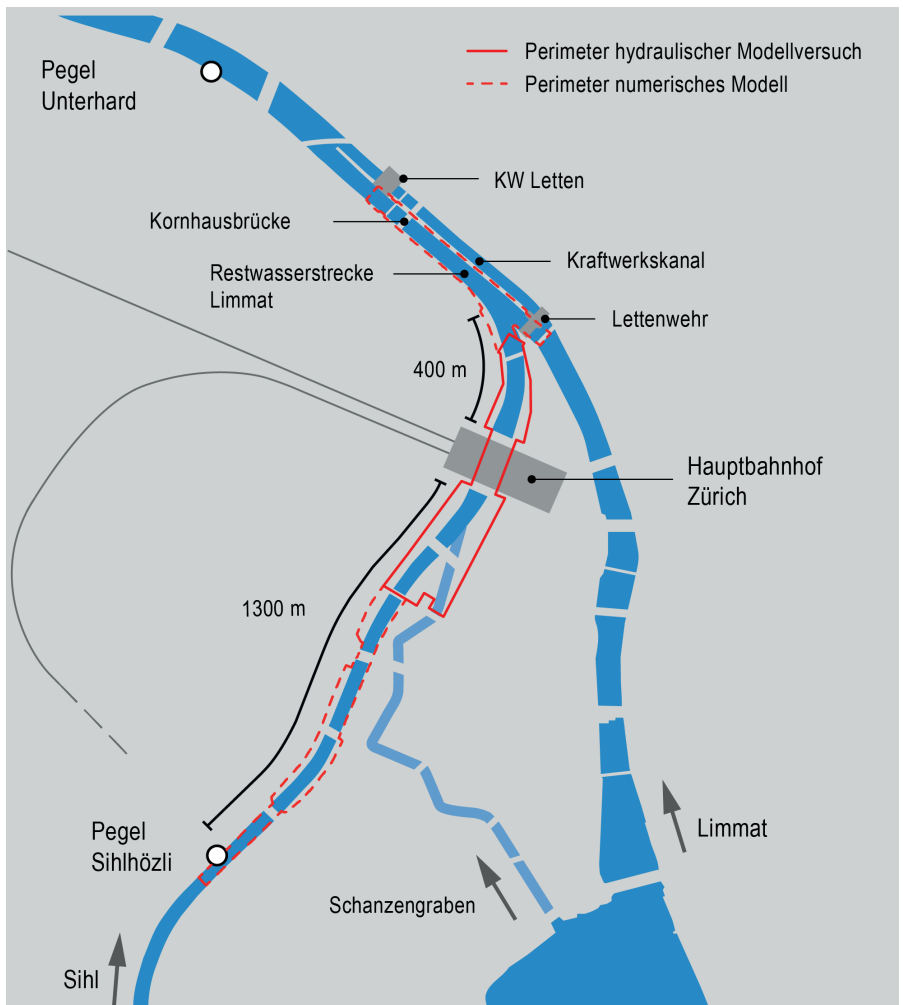


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet Sihldurchlässe (VAW, mod. nach EWZ)

Für die Szenarien der GK wurde angenommen, dass bei Extremereignissen das KW Letten abgeschaltet wird und der gesamte Abfluss über die RWS fliesst. Tabelle 1 zeigt für die Szenarien der GK die entsprechenden Abflusskombinationen sowie die Geschiebe- und Schwemmholtfrachten während der Ereignisse gemäss den Festlegungen für die Modellversuche der VAW sowie den zur Verfügung stehenden relevanten Studien (Flussbau AG 2009, 2010).

Tabelle 1: Abflusskombinationen gemäss GK Stadt Zürich sowie Geschiebe- und Schwemmholzfrachten

Szenario	Abfluss Sihl [m <sup>3</sup> /s]	Abfluss RWS Limmat [m <sup>3</sup> /s]	Gesamtabfluss [m <sup>3</sup> /s]	Geschiebefracht [m <sup>3</sup> ]	Schwemmholz- fracht [m <sup>3</sup> ]
HQ100	360	240	600	6'900	3000 (≅ HQ <sub>300</sub> )
HQ300	450	150	600	10'100	3000
EHQ	550	250	800	-	-

## MODELLZUSTÄNDE

Die Bauarbeiten für die Erstellung der SBB-Durchmesserlinie Altstetten – Zürich HB – Oerlikon („DML“) führten im Untersuchungsgebiet zu massgebenden baulichen Veränderungen. Für die Untersuchung der Abflusskapazität der Sihldurchlässe wurde daher zwischen dem Zustand 2006 – vor dem Bau der DML – sowie dem Zustand 2014 – nach Abschluss der Bauarbeiten – unterschieden.

### Zustand 2006

Bis 2006 verfügte die Sihl unterhalb des HB Zürich über eine grösstenteils natürliche Flusssohle, in deren letztem Drittel mit einer Überdeckung von ca. 1.3 m der Tiefbahnhof Museumsstrasse lag (Abbildung 2, Ziffer 1). Die Decke der Durchlässe setzt sich aus den Gleisbrücken der 16 Hauptgleise sowie den Bahnsteigen zusammen und ist von der Sihl frei zugänglich (Abbildung 2, Ziffer 2). Im Einlaufbereich unterhalb der Postbrücke nimmt die lichte Höhe von ca. 4.5 m auf etwa 3 m ab. Erst unterhalb der ersten Gleisbrücke ist somit der kritische Querschnitt im Einlaufbereich vorhanden (Abbildung 2, Ziffer 3).

Die Durchlässe werden von Zwischenmauern unterteilt, welche als Widerlager für die Gleisbrücken dienen. Das untere Ende der Durchlässe wird von der Zollbrücke überspannt. Kurz vor diesem Bauwerk liegt bei sämtlichen Durchlässen der tiefste Punkt der Deckenkonstruktion (Abbildung 2, Ziffer 4). Ober- sowie unterstrom des HB Zürich befanden sich bis 2006 im Einflussbereich der Trennmauer ausgedehnte, teils stark bewachsene Schotterinseln.

In diesem Zustand kam es in den Jahren 2005, 2006 und 2007 zu grösseren Hochwasserereignissen, welche anhand von Hochwasserspuren („HW-Spuren“) dokumentiert wurden.

### Zustand 2014

Zur Erhöhung der Hochwassersicherheit während der Bauarbeiten für die DML wurde die Sohle in den Sihldurchlässen gegenüber der mittleren Sohle von 2006 um ca. 0.6 m abgesenkt und auf dieser Höhenlage flächig mit armiertem Beton versiegelt (Abbildung 2, Ziffer 5). Der Tiefbahnhof Löwenstrasse wurde neu erstellt und liegt ca. 0.8 m bis 1.3 m unterhalb der Sohlversiegelung (Abbildung 2, Ziffer 6). Die Deckenplatten der Tiefbahnhöfe befinden sich in Trögen, welche mit Sohlmaterial der Sihl aufgefüllt wurden (Abbildung 2, Ziffern 7). Die Deckenstruktur der Sihldurchlässe wurde im Rahmen der Bauarbeiten für die DML nicht verändert. Neben der Absenkung der Sohle in den Durchlässen wurden flussauf sowie flussab

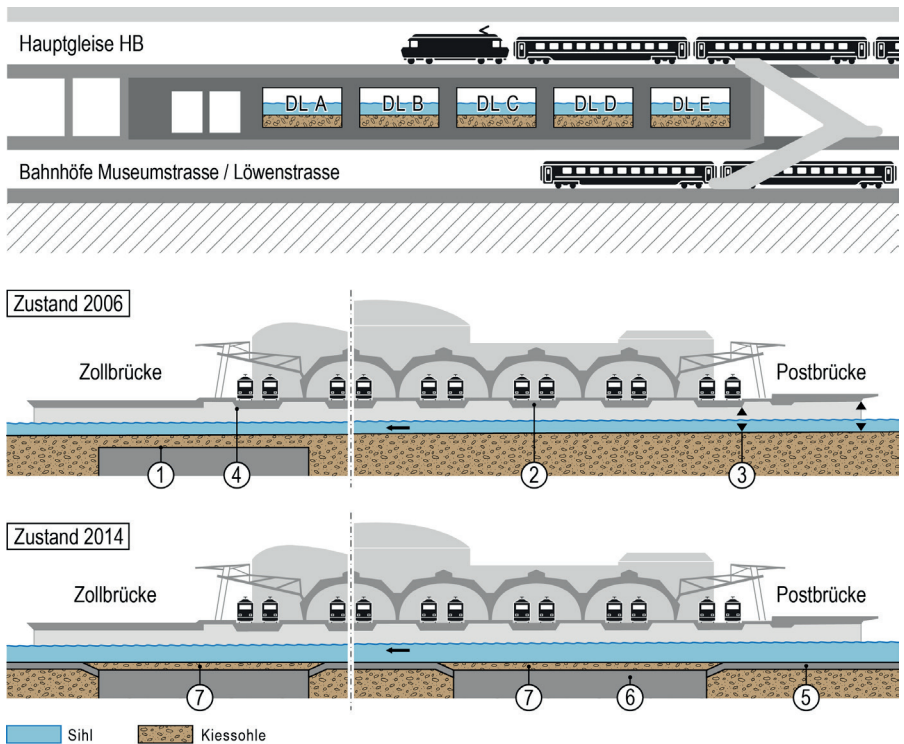


Abbildung 2: Sihldurchlässe: Querschnitt und Längsschnitte in den Modellzuständen 2006 und 2014 (VAW, mod. nach SBB)

des HB Zürich in der Sihl Baggerungen von bis zu 1 m Tiefe vorgenommen. Die Trennmauer oberhalb des HB wurde teilweise abgebrochen.

## HYBRIDE MODELLIERUNG

### Numerisches Modell

Aufgrund der komplexen Randbedingungen für den Betrieb des hydraulischen Modells wurden von der VAW mit der Simulationsumgebung BASEMENT für beide Modellzustände hydronumerische 2D-Modelle erstellt. Der Perimeter der hydronumerischen Modelle erstreckte sich von der Pegelstation Sihlhölzli bis zur Kornhausbrücke (Abbildung 1), der Betrieb erfolgte rein hydraulisch mit fester Sohle. Die Kalibrierung des numerischen Modells erfolgte mit Hilfe von 15 HW-Spuren des Hochwasserereignisses von August 2005 an Sihl und Limmat und erlaubte speziell im Bereich des Zusammenflusses eine korrekte Abbildung der Wasserspiegellagen. Die Ergebnisse des numerischen Modells wurden in den Elementen des Berechnungsnetzes entsprechend der Lage der HW-Spuren bestimmt und den Naturwerten gegenübergestellt (Tabelle 2). Die Kalibrierung erfolgte über Optimierungen der Randbedingungen, der Netzauflösung sowie durch Anpassung der Rauigkeitsbeiwerte. Die Validierung

des Modells wurde anhand der Hochwasserereignisse in 2006 und 2007 durchgeführt, wobei nur für den Nahbereich des HB Zürich Hochwasserspuren vorlagen (Tabelle 2).

### Laborversuch

Zur Untersuchung der Abflussverhältnisse in den Sihldurchlässen wurde in der Versuchshalle der VAW ein hydraulisches Modell im Massstab 1:30 nach Froude'scher Modellähnlichkeit errichtet. Das Modell bildete 900 m Fließstrecke der Sihl ab, die maximale Breite des Modellperimeters betrug 200 m. Der Modelleinlauf befand sich im Prototyp 400 m oberhalb des HB Zürich, das Modellende lag 50 m flussauf des Zusammenflusses von Sihl und Limmat. Die korrekte Wiedergabe des Wasserstandes beim Modellauslauf wurde durch ein gestautes Auslaufbecken mit automatischer Regulierung des Wasserstands sichergestellt.

Das Hauptgerinne der Sihl war mit beweglicher Sohle ausgestattet, während der Schanzengraben sowie die Ufer im Modell befestigt wurden. Für einen optimalen optischen Zugang wurden die Sihldurchlässe sowie die Seitenmauern des Modells in diesem Bereich in Acrylglas ausgeführt. Die Wasserspiegel wurden durch Ultraschallsensoren sowie Messzylinder, welche über kommunizierende Röhren mit der Flusssohle verbunden waren, aufgezeichnet. Die Sohllagen im Modell wurden mittels Laserdistanzmessung aufgenommen. Die Geschiebezugabe erfolgte über eine automatisierte Beschickungsanlage, Schwemmh Holz wurde manuell zugegeben.

Tabelle 2: Abweichungen für Kalibrierung und Validierung von numerischer Modellierung und Laborversuch

Hochwasser - ereignis	Numerisches Modell		Laborversuch	
	Mittlerer Fehler [m]	Maximaler Fehler [m]	Mittlerer Fehler [m]	Maximaler Fehler [m]
22.08.2005 $Q_{\max} = 280 \text{ m}^3/\text{s}$	0.17	0.25	0.05	0.16
17.09.2006 $Q_{\max} = 172 \text{ m}^3/\text{s}$	0.14	0.21	0.03	0.18
08.08.2007 $Q_{\max} = 229 \text{ m}^3/\text{s}$	0.29	0.5	0.02	0.13

Die Kalibrierung des hydraulischen Modells erfolgte anhand der Hochwasserereignisse in den Jahren 2005 / 2006 / 2007 und in Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der parallel durchgeführten numerischen Simulationen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die mittleren sowie maximalen Abweichungen der Kalibrierungs- und Validierungsereignisse.

Die Ergebnisse des numerischen Modells waren bei sämtlichen Szenarien massgebend für die Festlegung der unteren Randbedingung im Laborversuch. Die Wasserspiegellagen wurden in einem Zielelement aus der hydronumerischen Simulation des jeweiligen Szenarios ausgelesen, massstäblich umgerechnet und mittels eines Korrekturwerts an die Strömungsbedingun-

gen im Auslaufbecken des hydraulischen Modells angepasst. Diese korrigierten Zielwerte wurden für die automatisierte Steuerung des Wasserstands im Auslaufbecken verwendet.

## ERGEBNISSE

### Maximale Abflusskapazität

Die Versuche im hydraulischen Modell verdeutlichten den massgebenden Einfluss des Rückstaus der Limmat auf die Abflussverhältnisse und die Wasserspiegellagen im Bereich der Sihldurchlässe. Angaben zur Abflusskapazität der Sihl können daher nur in Kombination mit dem jeweiligen Abfluss in der Limmat eindeutig interpretiert werden. Als maximale Abflusskapazität  $Q_{\max}$  wurde durch das AWEL und die VAW der Abflusszustand festgelegt, bei dem ein „gleichmässiges Anschlagen des Wasserspiegels an Gleisbrücken bzw. Brückenbauwerken“ zu beobachten ist. Die Versuche im hydraulischen Modell zeigten, dass  $Q_{\max}$  gemäss dieser Definition bei einem Spitzenabfluss von  $490 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht ist und in Kombination mit einem Limmatabfluss von  $190 \text{ m}^3/\text{s}$  gilt („ $Q_{\max} 490/190$ “). Dieser Wert wurde im Laborversuch für die Zustände 2006 und 2014 sowie für Versuche mit und ohne Schwemmholzzugabe bestätigt.

Die Laborversuche zeigten, dass  $Q_{\max}$  auch durch eine Absenkung des Wasserspiegels beim Zusammenfluss Sihl / Limmat nicht signifikant vergrössert werden kann, obwohl die Strömungsprozesse in der Sihl stark durch den Limmatwasserstand beeinflusst werden. Grund dafür ist das gewählte Kriterium, bei dem der maximale Abfluss durch ein gleichmässiges Anschlagen des Wasserspiegels an der Deckenstruktur der Durchlässe definiert ist. Ein geringerer Limmatabfluss führte zwar im Mittel zu einer Absenkung der Wasserspiegel im Bereich des HB Zürich, aufgrund der grösseren Fließgeschwindigkeiten bzw. Froudezahlen kam es jedoch zu verstärkter Wellenbildung.

### Prozesse im Zustand 2006

Im Zustand 2006 kam es bei  $Q_{\max} 490/190$  im Einlaufbereich der Durchlässe zum Anschlagen des Wasserspiegels, das mittlere Freibord im kritischen Querschnitt betrug 0.2 bis 0.3 m. Aufgrund des Stammdurchmessers des Schwemmholzes von 0.3 bis 0.4 m passierte dieses die Sihldurchlässe zum grössten Teil, nur vereinzelt blieben Stämme an Widerlagern hängen. Bei den beobachteten Prozessen wurden jedoch lokal die Grenzen der Modellähnlichkeit erreicht. Das Schwemmholz wurde im Laborversuch als entastet modelliert und teilweise während der Versuche an den idealisierten Gleisbrücken aus Acrylglas entlangeschoben. Überlastversuche mit vollständiger Abdichtung des mittleren Durchlasses zeigten jedoch, dass es auch bei Vorhandensein von massiven Verklausungskörpern im Einlaufbereich zu keiner plötzlichen Reduktion der Abflusskapazität kommt. Unterhalb der Verklausungskörper wurden in der natürlichen Flusssohle tiefe Kolke gebildet, welche die Abflusskapazität aufrechterhielten. Im Auslaufbereich der Sihldurchlässe wurde hinsichtlich der Wasserspiegellagen der Rückstau der Limmat als massgebender Parameter identifiziert. Die Sohllagen flussab des HB Zürich



sowie die Schotterinseln hatten nur einen geringen Einfluss auf die Abflussverhältnisse in diesem Bereich.

### **Prozesse im Zustand 2014**

Aufgrund des dominierenden Rückstaus der Limmat führten die Baggerungen sowie die Sohlversiegelung in den Durchlässen im Zustand 2014 zu keiner signifikanten Erhöhung der Abflusskapazität. Durch die tieferen Sohllagen lagen die Wasserspiegel bei  $Q_{max}$  490/190 um 0.3 bis 0.4 m unterhalb des kritischen Querschnitts im Einlaufbereich, wodurch das Verklausungsrisiko reduziert wurde. Die Schwachstelle der Abflusskapazität lag im Zustand 2014 somit im unteren Drittel der Sihldurchlässe, an dieser Stelle wurde bei  $Q_{max}$  490/190 das erste Anschlagen des Wasserspiegels festgestellt. Auch in diesem Bereich blieb aufgrund der beschriebenen Effekte nur vereinzelt Schwemmholz hängen. Die Überlastversuche mit Abdichtung des mittleren Durchlasses zeigten, dass die Sohlversiegelung die Bildung von Kolken unterhalb von Verklausungen verhindert und in diesem Fall einen negativen Einfluss auf die Abflusskapazität hat.

### **Sohlentwicklung**

Der Gerinnequerschnitt der Sihl verbreitert sich oberstrom des HB Zürich von 55 m auf 70 m. Gleichzeitig ist die Sohlneigung in diesem Flussabschnitt geringer, so dass der Bereich oberstrom des HB Zürich eine Auflandungsstrecke darstellt. Durch den Rückstau der Limmat im Hochwasserfall wird dieser Effekt verstärkt und es kommt auch flussab des HB Zürich zu Auflandungen. Das Vorhandensein grosser Schotterinseln im Zustand 2006 bestätigt diese Beobachtungen. Bei sämtlichen untersuchten Hochwasserszenarien kam es oberstrom der Sihldurchlässe zu Auflandungen. In den Durchlässen wurde bei diesen Szenarien die Bildung von Geschiebeansammlungen beobachtet, deren Fronten sich bei fortschreitender Versuchsdauer mit gleichbleibender Mächtigkeit durch die Durchlässe bewegten. Dieser Prozess wurde in beiden Modellzuständen beobachtet, ist in Zustand 2014 aufgrund der tieferen Sohllagen jedoch stärker ausgeprägt. Signifikanter Geschiebetransport aus der Sihl in die Limmat konnte bei keinem der untersuchten Hochwasserszenarien beobachtet werden.

### **Bestvariante**

Das AWEL erteilte für die Projektierung der Durchmesserlinie die Auflage, dass das Sihlgerinne nach Abschluss der Bauarbeiten wieder in einen natürlichen Zustand versetzt wird. Vor diesem Hintergrund wurde von der VAW eine Bestvariante für das künftige Erscheinungsbild der Sihl im Bereich des HB Zürich entwickelt. Untersuchungen des Einflusses der Trennmauer zwischen Sihl und Schanzengraben zeigten, dass deren Entfernung keine negativen Auswirkungen auf die Abflusskapazität hat, jedoch eine dynamischere Entwicklung der Sohle zulässt.

Eine natürliche Kieselsohle in den Durchlässen ist für die Fischgängigkeit der Sihl sowie die Interaktion mit dem Grundwasserkörper von Vorteil. Vor diesem Hintergrund und unter

Berücksichtigung der ermittelten Abflusskapazitäten empfiehlt die VAW, die Sohlversiegelung in den Sihldurchlässen zu entfernen und die natürliche Kiessohle wieder herzustellen. Durch die natürliche Auflandungstendenz im Untersuchungsgebiet werden auf Dauer die Sohlhöhen des Zustands 2006 wieder erreicht werden.

Die Laborversuche zur maximalen Abflusskapazität im Zustand 2006 zeigten im Einlaufbereich der Sihldurchlässe Kolkstiefen zwischen -1.5 und -2 m. Eintiefungen dieser Grössenordnung gefährden die Foundationen der Zwischenmauern der Sihldurchlässe und dementsprechend die Stabilität der darauf gelagerten Gleisbrücken. Im hydraulischen Modell wurde daher für den Einlaufbereich die Wirksamkeit eines Kolkschutzes mittels Blockteppich (Natursteinblöcke à 1.5 t) überprüft und bei  $Q_{max}$  490/190 bestätigt.

### FAZIT

Gemäss der beschriebenen Definition liegt die maximale Abflusskapazität der Sihl beim HB Zürich in beiden Modellzuständen bei einem Sihlabfluss von 490 m<sup>3</sup>/s in Kombination mit einem Limmatablfluss von 190 m<sup>3</sup>/s. Höhere bzw. tiefere Wasserspiegel in der Restwasserstrecke der Limmat beeinflussen die maximale Abflusskapazität der Sihldurchlässe entsprechend der Definition als Anschlagen des Wasserspiegels an Bauwerksunterkanten nicht signifikant. Bei Spitzenabflüssen bis  $HQ_{300}$  ist der Einfluss der Limmat jedoch massgebend und verlangt eine ganzheitliche Interpretation und Untersuchung der Abflussverhältnisse im Bereich des HB Zürich. Die Untersuchungen im hydraulischen Modell haben gezeigt, dass das Verklausungsrisiko bei diesen Maximalabflüssen gering ist, jedoch von Modelleffekten ausgegangen werden muss. Für die zukünftige Gestaltung der Sihl im Untersuchungsgebiet empfiehlt die VAW die Wiederherstellung der natürlichen Kiessohle mit den Sohlagen von 2006. Die Sohlversiegelung in den Durchlässen bringt keine massgebende Erhöhung der Abflusskapazität und kann vor diesem Hintergrund rückgebaut werden. Aufgrund der Kolkbildung bei Extremereignissen im Einlaufbereich der Sihldurchlässe sind lokale Schutzmassnahmen der Sohle anzuraten. Die Entfernung der Trennmauer zwischen Sihl und Schanzengraben führen zu einer dynamischeren und natürlicheren Sohlentwicklung.

### LITERATUR

- Basler und Hofmann AG (2008). Gefahrenkartierung Hochwasser Stadt Zürich, Technischer Bericht. Im Auftrag des AWEL. Stand: 24. November 2008 (unveröffentlicht)
- Flussbau AG (2009). Schwemmh Holzstudie Sihl. Stand: 15. Dezember 2009 (unveröffentlicht)
- Flussbau AG (2010). Geschiebehaltstudie Sihl - Limmat. Stand: 20. August 2010 (unveröffentlicht)
- Kanton Zürich (2012). Wasserbau, Hochwasserschutz Sihl-Zürichsee-Limmat (Ausgabenbewilligung). Regierungsratsbeschluss 925. Stand: 12. September 2012
- Marti C. et al. (2014). Hochwasserschutz Sihl-Zürichsee-Limmat. Tagungsband „Wasserbau und Flussbau im Alpenraum“, VAW-Mitteilung 227/228 (R. Boes, ed.), VAW, ETH Zürich
- Scherrer AG (2013). Hochwasser-Hydrologie der Sihl - Hochwasserabschätzung unterhalb des Sihlsees bis Zürich. Im Auftrag des AWEL. Stand: Juli 2013 (unveröffentlicht)