



# 2D Simulation von Hochwasserszenarien an der Sihl in der Stadt Zürich

*(2D Simulations of Flood Scenarios at the Sihl River in the City of Zurich)*

**Lukas Vonwiller, Michel Kuhlmann, Steffen Corbe,  
Matthias Oplatka, Marc Hauser**

## **Kurzfassung**

Die Sihl mündet auf ihrem Schwemmkegel in der Stadt Zürich in die Limmat. Kurz vor der Mündung unterquert die Sihl in fünf Durchlässen den Hauptbahnhof Zürich. Die TK CONSULT AG hat im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) und der Schweizerischen Bundesbahn AG (SBB) numerische 2D Simulationen auf dem Schwemmkegel der Sihl durchgeführt. Es wurden verschiedene Hochwasserszenarien bei den Sihldurchlässen (Auflandung, Verklausung), die Wirkung des Hochwasserentlastungsstollens und lokale Schutzmassnahmen beim Hauptbahnhof Zürich bis zur Inbetriebnahme des Entlastungsstollens untersucht.

Die Sihldurchlässe beim Hauptbahnhof Zürich werden im 2D Modell mit einer Pegel-Abfluss Beziehung als innere Randbedingung abgebildet, welche sowohl Freispiegel als auch Druckabfluss berücksichtigt. Für den Freispiegelabfluss wurde ein lokales hochaufgelöstes 2D Modell verwendet. Zudem wurde der Ansatz für den Druckabfluss mittels hydraulischen 3D-CFD Simulationen und den Resultaten der Laborversuche an der VAW (ETH Zürich) für den Überlastfall validiert. Für die Brücken, welche ab einem gewissen Abfluss zuschlagen, wurden ebenfalls Pegel-Abfluss Beziehungen definiert unter Einbezug des Freispiegelabflusses, Druckabflusses und Überströmens der Brücke. Die Ergebnisse zeigen, dass der Abbildung von hydraulischen Bauwerken mit inneren Randbedingungen eine wichtige Rolle zukommt. Im urbanen Raum spielen insbesondere Durchlässe, Tunnel und Brücken eine wichtige Rolle. Zudem kann mit dem Modell die Wirkung des geplanten Hochwasserentlastungsstollens aufgezeigt werden. Dieser spielt eine zentrale Rolle, um den Hochwasserschutz auf dem Schwemmkegel der Sihl in Zukunft zu gewährleisten.

## **Abstract (English)**

The Sihl River flows through the city of Zurich on its alluvial fan. Just before the confluence with the Limmat River, the Sihl passes under the main railway station of Zurich in five culverts. TK CONSULT AG has carried out numerical 2D

simulations on flooding of the Sihl River on behalf of the Office for Waste, Water, Energy and Air of the Canton of Zurich (AWEL) and the Swiss Federal Railways (SBB). Various flood scenarios were tested to investigate the influence of deposition, backwater effects of the Limmat River, the effect of the flood relief tunnel and local protection measures at the main station until the flood relief tunnel is put into operation.

The culverts of the Sihl River at the main station are considered as inner boundary condition in the numerical 2D model using a level-discharge relationship for both free surface and pressure flow. The approach for the pressure flow was validated using 3D-CFD simulations and results of laboratory tests at VAW (ETH Zurich). In general, the representation of hydraulic structures using inner boundary conditions plays an important role in hydraulic 2D modelling. In particular, bridges and tunnels must be considered in urban areas. The simulation results show that the planned flood relief tunnel plays a key role for flood safety in the city of Zurich.

## **1 Einleitung**

### **1.1 Ausgangslage**

Die Stadt Zürich liegt zu einem Teil auf dem natürlichen Schwemmkegel der Sihl. Der Schwemmkegel wurde über die Jahre praktisch vollständig überbaut. Bereits 1910 richtete ein Hochwasserereignis in der stark gewachsenen Stadt grosse Schäden an und hat weite Teile der Stadt bis nach Altstetten überflutet. Während dem Hochwasserereignis vom 21./22. August 2005 betrug der Spitzenabfluss rund 280 m<sup>3</sup>/s, was einer Wiederkehrperiode von weniger als 30 Jahren entspricht. Dennoch war die Sihl teilweise bordvoll und hat kleine Hochwasserschäden verursacht. Die Sihl unterquert den Hauptbahnhof Zürich (HB Zürich) durch 5 Durchlässe. Das Schadenspotential wird allein in der Stadt Zürich auf rund 6.7 Mrd. Schweizer Franken geschätzt. Dabei sind volkswirtschaftliche Folgekosten wie z.B. Betriebsstörungen und Ausfall von Verkehrs- und Energieinfrastruktur nicht miteingerechnet.

Der Regierungsrat des Kantons Zürich hat im Jahre 2017 beschlossen einen Entlastungsstollen in Thalwil – von der Sihl in den Zürichsee – zu projektieren. Damit sollen zukünftig die Hochwasserspitzen von Extremereignissen in den Zürichsee umgeleitet werden. Die Baukosten betragen rund 170 Mio. Schweizer Franken und stehen somit in einem sehr guten Verhältnis zum Schadenspotential. Bei einem planmässigen Verlauf könnte der Entlastungsstollen ab Ende 2025 zur Verfügung stehen.

## **1.2 Auftrag und Ziele**

Die TK CONSULT AG hat im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) und den Schweizerischen Bundesbahnen AG (SBB) numerische 2D Überflutungssimulationen auf dem Schwemmkegel der Sihl durchgeführt. Im Vergleich zur bestehenden Gefahrenkarte wurden aktualisierte Grundlagen verwendet, wie z. B. Hydrologie (Scherrer, 2013), Abflussganglinien (Pöyry *et al.*, 2014), topographische Vermessungen der Sihl beim HB Zürich (Meisser, 2018) und neue Erkenntnisse aus Laborversuchen zu den Sihldurchlässen beim HB Zürich (VAW, 2015).

Anhand einer Sensitivitätsanalyse basierend auf dem Nettoprinzip soll das Prozessverständnis bei Hochwasser auf dem Schwemmkegel der Sihl verbessert werden. Beim Nettoprinzip steht die ausgeferte Wassermenge dem Hauptgerinne unterhalb der Ausuferungsstelle nicht mehr zur Verfügung. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden Szenarien für die Sihldurchlässe (Auflandungen, Verklausung, Rückstauereffekt Limmat), der Einfluss von Brücken, das Retentionsvolumen des Zimmerbergtunnels, die Wirkung mobiler Schutzmassnahmen der SBB beim HB und nicht zuletzt die Wirkung des Entlastungstollens untersucht. In einem nächsten Schritt werden basierend auf dem Bruttoprinzip die Grundlagen für die Risikobeurteilung und die Revision der Gefahrenkartierung Hochwasser für die Gefahrenquelle Sihl in der Stadt Zürich geschaffen. Beim Bruttoprinzip steht die ausgeferte Wassermenge dem Hauptgerinne unterhalb der Schwachstelle wieder zur Verfügung. Im vorliegenden Beitrag wird jedoch ausschliesslich auf Simulationsergebnisse nach dem Nettoprinzip eingegangen. Damit kann die Sensitivität der Szenarien aufgezeigt und das Prozessverständnis entsprechend verbessert werden. Der Fokus liegt dabei vor allem auf dem Einfluss von inneren hydraulischen Randbedingungen wie z.B. die Sihldurchlässe und Brücken.

## **1.3 Software und Numerisches Modell**

Für die hydraulische 2D Modellierung wird die Software BASEMENT (2019) verwendet. Die 2D Flachwassergleichungen werden mit einer Finite-Volumen-Methode numerisch gelöst. Die Rauigkeit wird mit dem Potenzansatz nach Strickler abgebildet, wobei die Rauigkeitsbeiwerte anhand von Hochwasserspuren aus dem Jahre 2005 kalibriert wurden.

## **1.4 Sihldurchlässe**

Die Sihl unterquert den HB Zürich in fünf Durchlässen (je 12 m Breite) über eine Länge von 190 m. Die Hydraulik und die Kapazität der Sihldurchlässe wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich in Laborversuchen untersucht (VAW, 2015). Für den Zustand 2014 wurde

bei einem Abfluss der Sihl  $Q_{Sihl} = 490 \text{ m}^3/\text{s}$  (Abfluss Limmat  $Q_{Limmat} = 190 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ein erstes Anschlagen des Wasserspiegels an der Decke im unteren Drittel der Sihldurchlässe beobachtet.

Im vorliegenden Projekt wurde für die Sihldurchlässe ein lokales hoch aufgelöstes 2D Modell erstellt. Mit typischen Rauigkeitsbeiwerten nach Strickler (Sohle Durchlass  $k_{st} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , Sohle Sihl  $k_{st} = 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) konnte mit den entsprechenden Abflüssen ( $Q_{Sihl} = 490 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Limmat} = 190 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ein Anschlagen des Wasserspiegels an der Durchlassdecke im unteren Drittel reproduziert werden. Der entsprechende Wasserspiegel beim Durchlasseingang wurde als Pegel definiert, ab welchem der Durchlass zuschlägt. Basierend darauf wurden mit dem lokalen Modell verschiedene Szenarien für Auflandungen (20 cm, 40 cm, 60 cm), Verkläusung (mittlerer Durchlass geschlossen) und Einfluss des Limmatabflusses untersucht. Je nach Szenario wird der Pegel für das Zuschlagen des Durchlasses für kleinere oder grössere Abflüsse erreicht. Daraus konnten verschiedene P-Q Beziehungen erstellt werden, welche sowohl den Freispiegelabfluss (lokales 2-D Modell) sowie den Druckabfluss (bei Zuschlagen des Durchlasses) mit der Bernoulli-Gleichung berücksichtigen. Für den Druckabfluss wurden lokale Ein- und Auslaufverluste, Reibungsverluste und die P-Q Beziehung am Ende des Durchlasses berücksichtigt. Basierend auf Anhaltspunkten aus den Überlastfallversuchen der Laborversuche der VAW (VAW, 2015) und zusätzlichen hydraulischen 3D-CFD Simulationen konnten die P-Q Beziehungen für den Druckabfluss kalibriert werden.

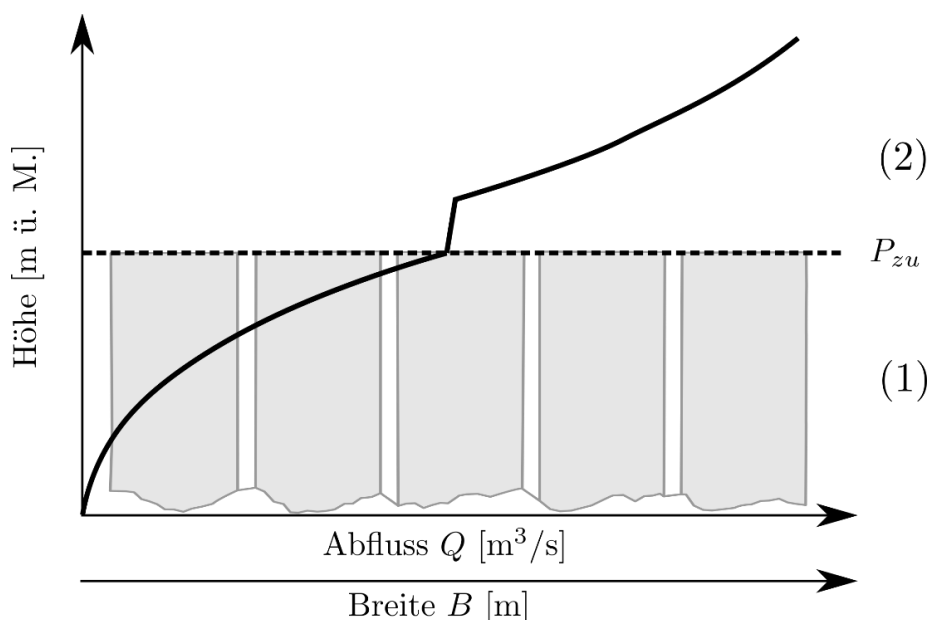


Abb. 1: P-Q Beziehung Sihldurchlässe beim Hauptbahnhof Zürich mit (1) Freispiegelabfluss und (2) Druckabfluss mit der Bernoulli-Gleichung

## 1.5 Brücken

An der Sihl wurden 14 Brücken identifiziert, bei welchen die Kapazitätsgrenze bis zum EHQ erreicht oder überschritten wird. Das Zuschlagen einer Brücke wird definiert, wenn der Wasserspiegel die Brückenunterkante erreicht. Für jede Brücke wird basierend auf dem Lichtraumprofil eine flächenäquivalente Ersatz-Trapezfläche bestimmt (Abb. 2). Daraus kann eine Brückenunterkante (UK) abgeleitet werden. Bis zum Erreichen der UK des Wasserspiegels liegt Freispiegelabfluss vor. Im vorliegenden Fall wurde die P-Q Beziehung für den Freispiegelabfluss anhand einer treppenförmigen Abflussganglinie im 2D Modell bestimmt. Wenn der Wasserspiegel die UK erreicht, gilt ein Abfluss unter einem Schütz. Der Ausflussbeiwert für das Schütz ( $\mu_A$ ) wurde mit 0.3 berücksichtigt. Dieser Wert wurde konservativ gewählt, da es sich um breite Brücken handelt, welche nicht als scharfkantige Schützen betrachtet werden können. Beim Zuschlagen einer Brücke können sich instabile pulsartige Abflusszustände und turbulente Strömungsablösungen einstellen, welche zusätzliche Energieverluste verursachen. Steigt der Wasserspiegel weiter an und erreicht die Brückenoberkante (OK) wirkt zusätzlich ein Wehrabfluss. Es wird davon ausgegangen, dass die Geländer mit Feinmaterial verstopfen und nicht abflusswirksam sind. Für den Überfallbeiwert für das Wehr ( $\mu$ ) wird ein Wert von 0.5 angesetzt. Die Flusssohle wird als stabil angenommen.

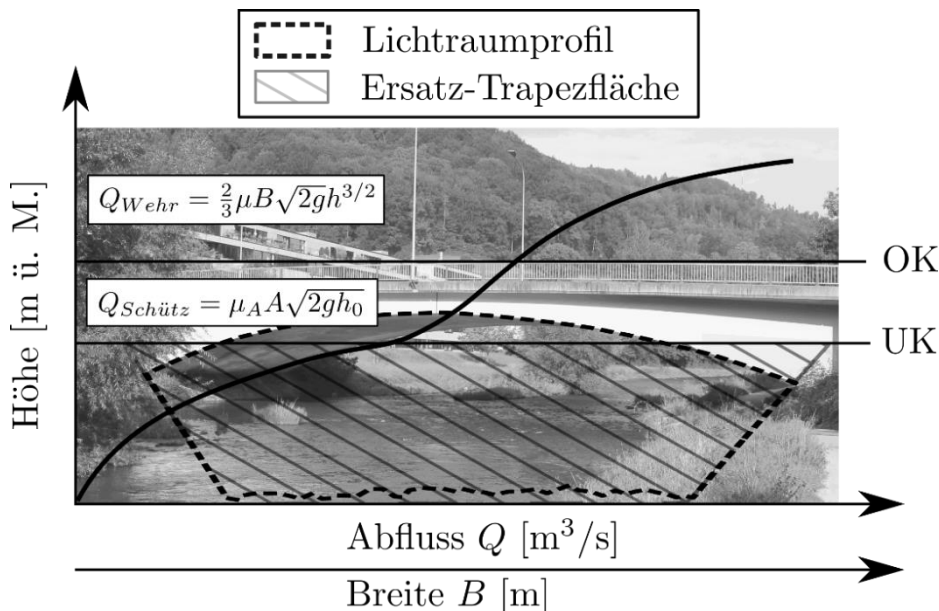


Abb. 2: Schematische Darstellung der P-Q Beziehung für Brücken mit Freispiegelabfluss bis zur Brückenunterkante (UK), Abfluss unter einem Schütz bis Brückenoberkante (OK) und einem zusätzlichen Wehrabfluss für Wasserpegel  $>$  OK. Beim Schütz bezeichnet  $\mu_A$  den Ausflussbeiwert,  $A$  die Fläche des Lichtraumprofils,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $h_0$  die Wassertiefe vor der Brücke. Für den Wehrüberfall bezeichnet  $\mu$  den Überfallbeiwert,  $B$  die Breite der Brücke und  $h$  die Überstauhöhe vor der Brücke.

## 1.6 Tunnel und Unterführungen

Die Hauptproblematik bei Tunnel und Unterführungen (TU) liegt darin, dass bei einer hydraulischen 2D Modellierung am selben Ort nicht gleichzeitig ein unterirdischer und ein oberirdischer Abfluss (z.B. über die Strasse) abgebildet werden können. Für die Berücksichtigung von TUs können drei Modellkonzepte unterschieden werden: (i) Direkte Verlinkung des Ein- und Auslaufs über Innere Randbedingungen im Hauptgitter (z.B. P-Q Beziehung mit Normalabfluss) falls das aufzunehmende Wasservolumen im TU vernachlässigbar ist, (ii) Verlinkung über ein zusätzliches Berechnungsgitter an das Hauptberechnungsgitter über innere Randbedingungen (z.B. P-Q Beziehung), (iii) Direktes Einbauen in das Hauptgitter falls kein zusätzlicher oberirdischer Abfluss stattfindet und die Berücksichtigung des Retentionsvolumens wichtig ist (z.B. Zimmerbergtunnel).

## 2 Resultate

Basierend auf dem Nettoprinzip konnten wichtige Erkenntnisse zum Systemverhalten gewonnen werden (vgl. Abb. 3). Die Berücksichtigung der Brücken führt dazu, dass Altstetten bereits ab einem  $HQ_{300}$  ( $540 \text{ m}^3/\text{s}$ ) anstatt einem  $EHQ$  ( $750 \text{ m}^3/\text{s}$ ) überflutet wird (Abb. 3, B). Der Zimmerbergtunnel mit einem Volumen von ca.  $300'000 \text{ m}^3$  wirkt als Retentionsspeicher und verhindert beim  $HQ_{100}$  ( $430 \text{ m}^3/\text{s}$ ) eine Flutung von Altstetten (Abb. 3, C). Die Wirkung des Entlastungstollens zeigt, dass die Stadt Zürich bis zum  $HQ_{500}$  ( $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ) vollständig vor Hochwasser geschützt werden kann (Abb. 3, D). Eine Restgefährdung besteht mit dem Entlastungstollen noch beim  $EHQ$ , wobei noch leichte Ausuferungen in der Brunau zu erwarten sind. Eine Verklausung des mittleren Sihldurchlasses beim HB führt zu Ausuferungen erst beim  $EHQ$ . Die Ausuferungen finden zuerst rechtseitig statt und führen zu einer Überflutung des Bahnhofplatzes. Die lokalen Schutzmassnahmen der SBB schützen die Gleisanlagen und Tiefbahnhöfe vor einer Überflutung bis zum  $EHQ$ .

## 3 Zusammenfassung

Bei der hydraulischen 2D Modellierung in urbanen Gebieten spielen hydraulische Bauwerke (Brücken, Tunnel, Durchlässe etc.) eine wichtige Rolle. Im vorliegenden Projekt hatte vor allem die Berücksichtigung von Brücken und Tunnel einen grossen Einfluss auf die Überflutungsflächen. Die Wirkung des Entlastungstollens konnte nachgewiesen werden, wobei die Stadt Zürich bis zu einem  $HQ_{500}$  vor Sihlhochwasser geschützt werden kann. In einem nächsten Schritt werden Simulationen nach dem Bruttoprinzip durchgeführt, um einerseits eine Grundlage für die Risikobeurteilung und andererseits eine Gefahrenkartierung Hochwasser für die Gefahrenquelle Sihl in der Stadt Zürich zu erstellen.

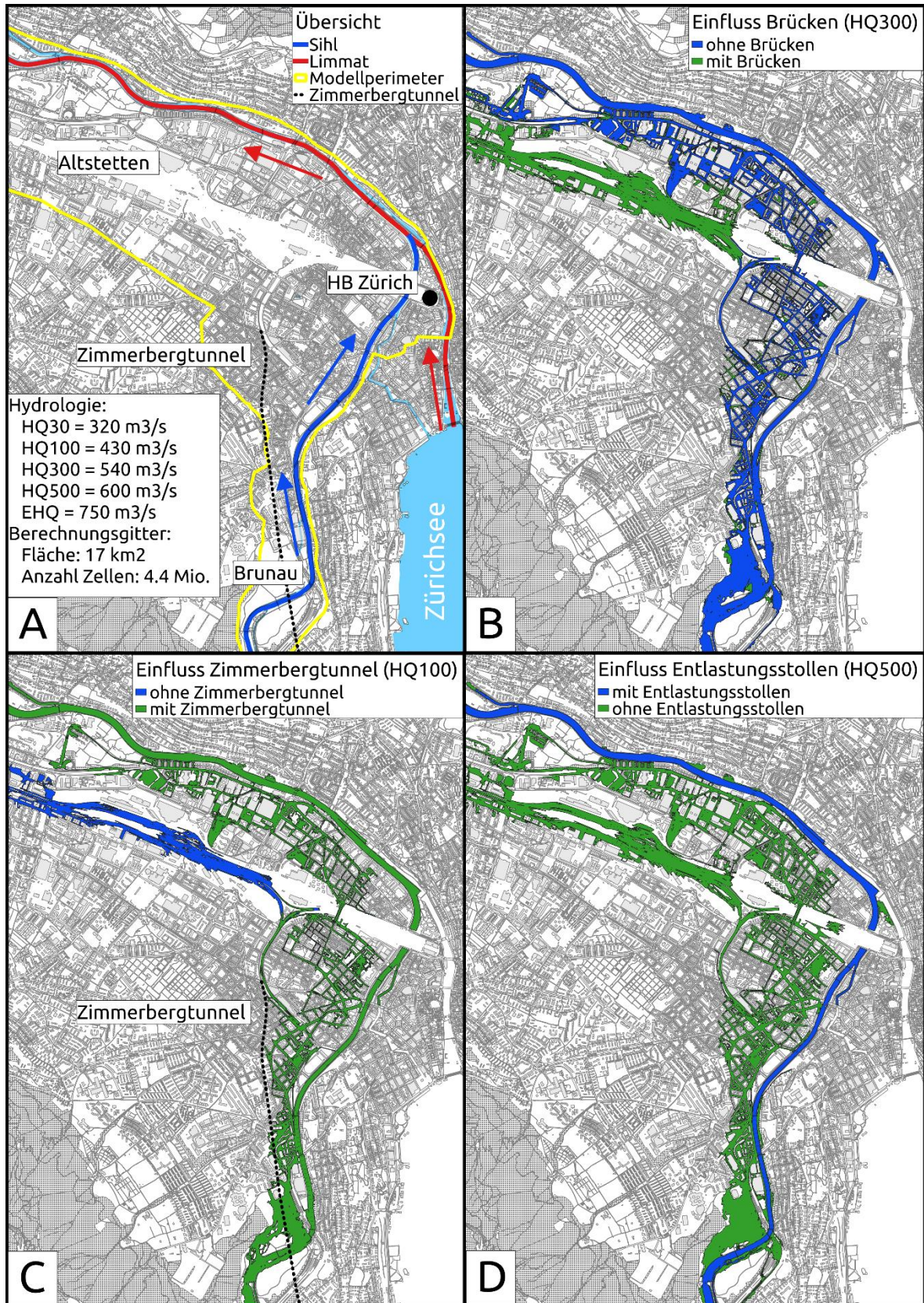


Abb. 3: Übersicht Modellperimeter und Angaben zu den Spitzenabflüssen der Hydrologie (A), Überflutungsflächen (grün/blau) zur Sensitivität der Brücken beim HQ300 (B), des Zimmerbergtunnels beim HQ100 (C) und des Entlastungsstollens beim HQ500 (D)

## **Danksagung**

Wir danken dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich und den Schweizerischen Bundesbahnen AG (SBB) für den interessanten Auftrag zur numerischen 2-D Modellierung der Sihl in der Stadt Zürich.

## **Referenzen**

BASEMENT (2019). Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. Software Version 3.0pre. © ETH Zürich, VAW, 2019

Meisser (2018). Vermessung der Sihldurchlässe und der Sihl im Bereich des Hauptbahnhofs, Meisser Vermessungen AG

Scherrer (2013). Hochwasser-Hydrologie der Sihl – Hochwasserabschätzung unterhalb des Sihlsees bis Zürich. Technischer Bericht 12/159, Scherrer AG

VAW (2015). Sihldurchlässe Hauptbahnhof Zürich, Hydraulische Modellversuche. Technischer Bericht, VAW Nr. 4308, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH

VAW (2019). Einlaufbauwerk Entlastungsstollen Thalwil, Hydraulische Modellversuche zur Trenncharakteristik, Technischer Bericht, VAW Nr. 4370-I, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH

Pöyry, TK CONSULT, WSL (2014). Hochwasserschutz Sihl - Zürichsee - Limmat, Teilprojekt 1: Massnahmen Zürichsee – Limmat. Beilage 2: Hydrologie WSL. Pöyry Schweiz AG, TK CONSULT AG, Eidg. Forschungsinstitut für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

## **Adressen der Autoren**

Dr. Lukas Vonwiller (korrespondierender Autor), Michel Kuhlmann, Steffen Corbe  
TK CONSULT AG

CH-8005 Zürich, Neugasse 136

Email: [lukas.vonwiller@tkconsult.ch](mailto:lukas.vonwiller@tkconsult.ch)

Dr. Matthias Oplatka

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

Abteilung Wasserbau

CH-8090 Zürich, Walcheplatz 2

Dr. Marc Hauser

Schweizerische Bundesbahn AG (SBB AG)

Natur und Naturrisiken

CH-3000 Bern