

Berücksichtigung von Brücken und des Sihldurchlasses im 2D-Überflutungsmodell in der Stadt Zürich

Lukas Vonwiller, Michel Kuhlmann, Mattias Deller, Steffen Corbe, Matthias Oplatka, Marc Hauser

Zusammenfassung

Hochwasserereignisse können Brücken und Durchlässe an ihre Kapazitätsgrenzen bringen. Durch einen Aufstau an diesen Bauwerken kann es zu entsprechenden Ausuferungen kommen. Im vorliegenden Beitrag soll am Beispiel der 2D-Überflutungssimulationen auf dem Schwemmkegel der Sihl in der Stadt Zürich aufgezeigt werden, wie die Brücken an der Sihl und der Sihldurchlass beim Hauptbahnhof Zürich anhand von Pegel-Abfluss-Beziehungen (PQ-Beziehungen) als innere Randbedingungen berücksichtigt werden können. Zudem soll der Einfluss auf die Überflutungsflächen exemplarisch anhand der Brücken aufgezeigt werden. Für die Berücksichtigung der Brücken und des Sihldurchlasses werden Ansätze für den Freispiegelabfluss und den Druckabfluss verwendet, wobei bei den Brücken zusätzlich ein Überströmen berücksichtigt wird. PQ-Beziehungen bieten sich an, um verschiedene Szenarien bei Brücken und Durchlässen zu untersuchen. Beim Sihldurchlass werden Szenarien bezüglich Auflandung, Verklausung und Rückstauereffekt der Limmat abgebildet. Die Modellierung der Szenarien und deren Auswirkungen auf die Ausuferungen tragen einerseits zu einer Verbesserung des Systemverständnisses im Hochwasserereignis bei und schaffen andererseits eine Entscheidungsgrundlage, um Szenarien für die Hochwassergefahrenkartierung zu definieren. Mit dem vorgestellten Verfahren lassen sich kritische Brücken und Durchlässe explizit anhand einer PQ-Beziehung beschreiben, wobei die verwendeten Ansätze und Annahmen klar ausgewiesen und definiert werden können.

um das aktuelle Schadenspotenzial neu zu beurteilen. Zum anderen wird das verwendete hoch aufgelöste 2D-Modell im Auftrag des AWEL erweitert, um die Gefahrenkarte Hochwasser der Gefahrenquellen Sihl, Limmat und Zürichsee für die Stadt Zürich zu erstellen.

Zu Beginn der Untersuchung war ungewiss, welche Rolle die Brücken beim Überflutungsprozess auf dem Schwemmkegel der Sihl spielen und wie der Sihldurchlass beim Hauptbahnhof bei den unterschiedlichen Szenarien zu berücksichtigen ist. Dem Sihldurchlass wurde für die Überflutungen im Bereich des Hauptbahnhofs eine Schlüsselrolle zugesprochen. Im vorliegenden Artikel soll aufgezeigt werden, wie die Brücken an der Sihl und der Sihldurchlass im numerischen 2D-Modell berücksichtigt wurden, und was die Auswirkungen auf die Überflutungen am Beispiel der Brücken sind.

1. Einleitung

Die Sihl durchfließt auf ihrem Schwemmkegel die Stadt Zürich. Kurz vor der Mündung in die Limmat unterquert die Sihl den Hauptbahnhof (HB) Zürich im Sihldurchlass (vgl. Bild 1). Das Schadenspotenzial im Überflutungsgebiet der Sihl auf dem Stadtgebiet ist eines der grössten in der Schweiz und beträgt nach bisheriger Einschätzung rund 6.7 Mrd. CHF (AWEL, 2017).

Die Firma TK CONSULT AG wurde von der Schweizerischen Bundesbahnen AG (SBB) und dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) beauftragt, numerische 2D-Simulationen zu Überflutungsszenarien auf dem Schwemmkegel der Sihl durchzuführen. Die Szenarien beinhalten sowohl den Ist-Zustand als auch den zukünftigen Zustand 2026 mit Wirkung des Entlastungstollens in Thalwil, der voraussichtlich ab 2026 in Betrieb sein wird. Die Ergebnisse der Überflutungssimulationen dienen den Auftraggebern zum einen als Grundlage,



Bild 1: Übersicht Schwemmkegel der Sihl von Brunau bis zur Mündung in die Limmat.

2. Numerisches Modell

Für die hydraulischen 2D-Simulationen wird die Software BASEMENT 3.0pre (BASEMENT, 2019) verwendet. Die Software löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen (2D-Massenbilanz- und

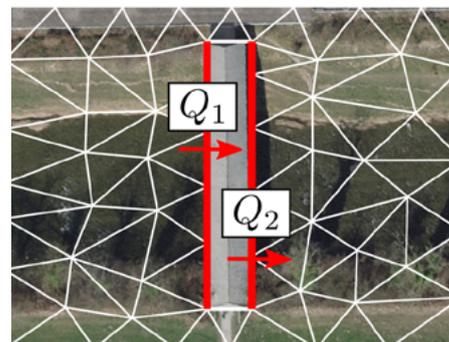


Bild 2: Schematische Darstellung des Berechnungsgitters (weisse Farbe) mit einer Brücke als innere Randbedingung: Am oberen Rand wird der Abfluss Q_1 (z. B. über eine PQ-Beziehung) vorgegeben und am unteren Rand wieder zugegeben (Q_2).

Impulsgleichungen) numerisch mit einer Finite-Volumen-Methode auf unstrukturierten Dreiecksgittern. Für die Simulation werden Grafikkarten (GPUs) verwendet, welche insbesondere für grosse Berechnungsgebiete eine deutliche Effizienzsteigerung bringen. Die Software BASEMENT bietet die Möglichkeit, hydraulische Bauwerke über innere Randbedingungen abzubilden. Dazu wird ein Teil des Berechnungsgitters ausgestanzt (vgl. Bild 2) und der Abfluss über den oberen Rand (Q_1) vorgegeben (z. B. über eine Pegel-Abfluss-Beziehung). Der entsprechende Abfluss wird beim unteren Rand (Q_2) wieder zugegeben.

3. Modellierung von Brücken

3.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Entlang der Sihl wurden im Stadtgebiet Zürich die relevanten Brücken identifiziert, welche nach dem Bruttoprinzip die Kapazitätsgrenze bis zu einem Abfluss von $750 \text{ m}^3/\text{s}$ (EHQ) erreichen. Im Gegensatz zum Nettoprinzip steht beim Bruttoprinzip die ausgeferte Wassermenge dem Hauptgerinne unterhalb der Schwachstelle wieder zur Verfügung. Als massgebend für die Abflusskapazität wurde an der Sihl der Wasserspiegel definiert, d. h., es wurden keine Freiborde berücksichtigt. Bis zur Kapazitätsgrenze wird von einem Frei-

spiegelabfluss ausgegangen. Die Brücke schlägt zu, sobald der Wasserspiegel die Brückenunterkante (UK) erreicht (vgl. Bild 3). Für höhere Abflüsse bzw. Wasserspiegel wird die Brücke eingestaut. Es kommt zu einem Abflusszustand, welcher mit einem Abfluss unter einem Schütz verglichen werden kann. Mit zunehmendem Abfluss übersteigt der Wasserspiegel zudem die Brückenoberkante (OK). Dieser Zustand kann mit einem Abfluss über ein Wehr berücksichtigt werden.

Das Zuschlagen der Brücke könnte alternativ auch anhand der Energielinie definiert werden, wobei die Brücke in den Druckabfluss übergeht, sobald die Energielinie die Brückenunterkante erreicht. Im vorliegenden Projekt wurde für den Übergang in den Druckabfluss der Wasserspiegel definiert. Des Weiteren können Verklausungen berücksichtigt werden, indem die Lichtraumfläche entsprechend verkleinert wird. Davon wird aber abgesehen, da der Schwemmholzrechen an der Sihl oberhalb von Langnau am Albis einen Grossteil des anfallenden Schwemmholzes zurückzuhalten vermag.

3.2 PQ-Beziehung Brücken

Zur Erstellung der Pegel-Abfluss-Beziehung müssen zuerst die Brückenunterkanten und Brückenoberkanten bestimmt werden.

Dafür wird für jede Brücke die Lichtraumfläche aus den Lichtraumprofilen der BAFU-Querprofilvermessungen bestimmt. Daraus kann ein flächenäquivalentes Ersatztrapez für den entsprechenden Fliessquerschnitt erstellt werden. Je nach Situation und Brückengeometrie sind zur Bestimmung der seitlichen Böschungen des Ersatztrapezes die Uferböschungen oberstrom der Brücke zu berücksichtigen. Aus der Höhe des resultierenden Ersatztrapezes lässt sich die Brückenunterkante definieren. Die Brückenoberkante wird auf der Höhe der Geländeroberkante definiert, da von einer Verstopfung bzw. Belegung der Geländer mit Geschwemmsel und Feinmaterial ausgegangen wird. Die Höhe der Brückenoberkante kann aus Plänen entnommen oder, falls keine Angaben zu Geländerrhöhe vorhanden sind, im Feld ergänzend aufgenommen werden.

In einem ersten Schritt wird die PQ-Beziehung des Freispiegelabflusses erstellt. Dafür wird eine treppenförmig ansteigende Abflussganglinie simuliert. Der Abfluss wird jeweils in Schritten von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ über eine längere Zeit konstant gehalten und dann über eine kürzere Zeit erhöht. Die Wasserpegel (P) und Abflüsse (Q) werden jeweils am Ende der konstanten Zeitperiode an den entsprechenden Brückenquerprofilen ausgewertet.

In einem nächsten Schritt kann die PQ-Beziehung des Freispiegelabflusses der Brückenunterkante gegenübergestellt werden. Für Wasserspiegel, welche die UK überschreiten ($P > UK$), wird ein Abfluss unter einem Schütz ($Q_{\text{Schütz}}$) nahtlos an die PQ-Beziehung des Freispiegelabflusses angehängt, unter Verwendung von

$$Q_{\text{Schütz}} = \mu_A A \sqrt{2gh_0}, \quad (1)$$

wobei μ_A = Ausflussbeiwert für das Schütz, A = Fläche des Lichtraumprofils, g = Erdbeschleunigung und h_0 = Wassertiefe vor der Brücke. Für rechteckige, scharfkantige Planschütze beträgt μ_A in Abhängigkeit von a/h_0 (a = Höhe Schützöffnung) minimal 0,55 (Bollrich, 2000). Brücken unterscheiden sich jedoch stark von scharfkantigen Planschützen, weshalb von tieferen Werten ausgegangen werden muss. Gemäss USDA (2012) liegen die Ausflussbeiwerte in den meisten Fällen zwischen 0,38 und 0,50, im Falle von schlechten Bedingungen (sehr hohe Turbulenzen) jedoch zwischen 0,22 und 0,28. Im vorliegenden Projekt werden die Abflussbeiwerte für das Schütz konservativ mit $\mu_A = 0,3$ berücksichtigt.

Schliesslich wird für Wasserspiegel, welche die OK überschreiten ($P > OK$), ein

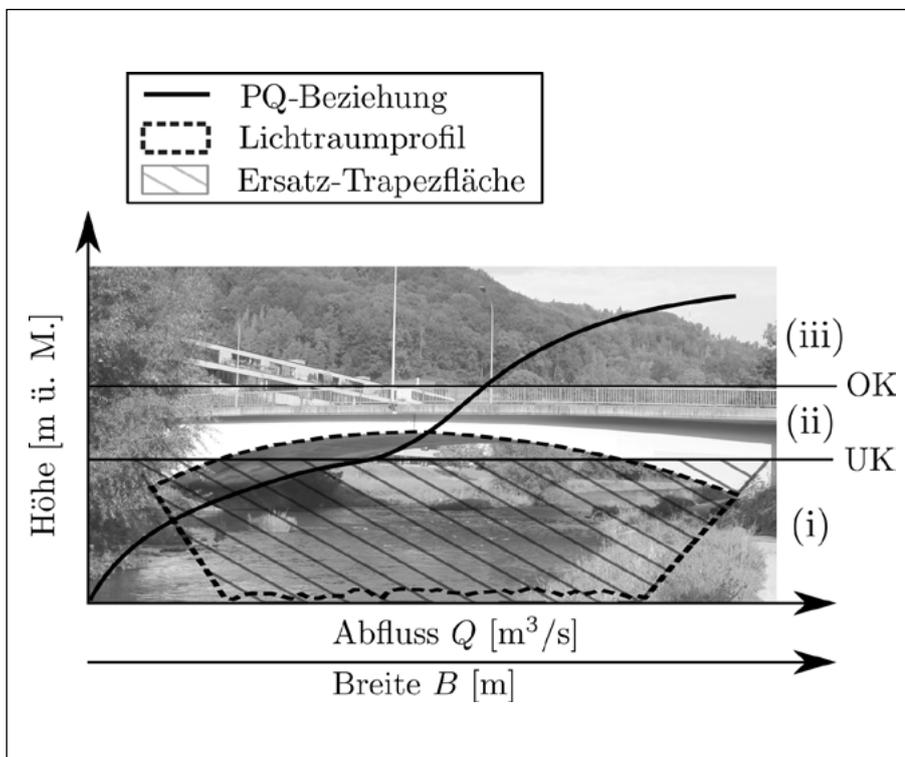


Bild 3: Schematische PQ-Beziehung bei Brücken: (i) Freispiegelabfluss bis zur Brückenunterkante (UK), (ii) Abfluss unter einer Schütz bis zur Brücken-/Geländeroberkante (OK) und (iii) ein zusätzlicher Wehrabfluss für Wasserpegel $> OK$. Die Ersatz-Trapezfläche (schraffierte Fläche) ist flächenäquivalent zum Lichtraumprofil (gestrichelte Linie).

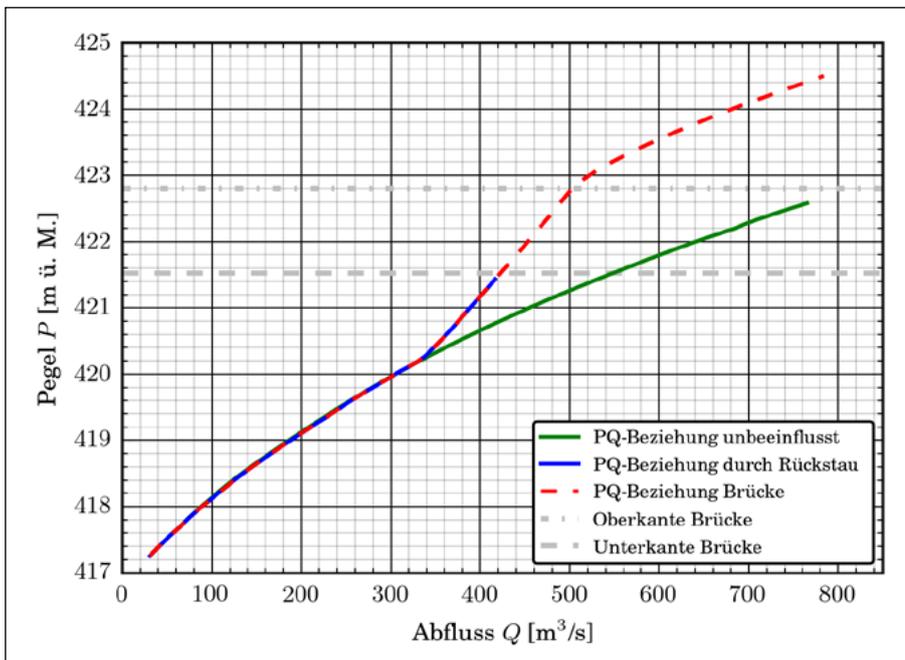


Bild 4: PQ-Beziehungen an der Brunaustrassenbrücke mit Berücksichtigung des Rückstaueffekts der unterstrom liegenden Brunaubahnbrücke: unbeeinflusster Freispiegelabfluss ohne Brücken (grüne Linie), mit Rückstau aufgrund der unteren Brücke (bis zum Anschlagen an Brückenunterkante, blaue Linie) und der resultierenden PQ-Beziehung mit Druckabfluss und Überströmung (rot gestrichelte Linie).

empirischer Ansatz für ein Abfluss über ein Wehr (Q_{Wehr}) dazugeschaltet, gemäss

$$Q_{\text{Wehr}} = \frac{2}{3} \mu B \sqrt{2gh}^3, \quad (2)$$

wobei μ = Wehrüberfallbeiwert, B = Breite der Brücke und h = Überstauhöhe vor der Brücke. Für breitkronige Wehre beträgt der Überfallbeiwert $\mu = 0,58$ (Bollrich, 2000). Für Strassenbrücken werden in der Literatur Überfallbeiwerte zwischen 0,47 und 0,54 angegeben (USDA, 2012). Im vorliegenden Projekt wird für alle Brücken $\mu = 0,50$ verwendet.

Bei nahe beieinander liegenden Brücken kann sich die im Unterstrom liegende Brücke über einen Rückstau auf die im Oberstrom liegende Brücke auswirken. Um den Rückstau zu berücksichtigen, werden Brücken identifiziert, welche sich gegenseitig beeinflussen. Als Erstes wird die unterste Brücke als PQ-Beziehung eingebaut und das vorher beschriebene Vorgehen für die im Oberstrom liegende Brücke ein weiteres Mal durchgeführt. Dies wird entsprechend der Anzahl sich gegenseitig beeinflussender Brücken wiederholt. Die Berücksichtigung des Rückstaueffekts auf eine im Oberstrom liegende Brücke hat zur Folge, dass der Wasserspiegel bereits für geringere Abflüsse an der Brückenunterkante anschlägt und sich im Bereich der Brücke ein Druckabfluss einstellt (vgl. Bild 3). Mit dem vor-

gestellten Vorgehen wird ausschliesslich der Rückstau auf die oberliegende Brücke bis zum Anschlagen an die Brückenunterkante berücksichtigt. Zusammen mit der Berücksichtigung des Druckabflusses (Schütz) und der Überströmung (Wehr) ergibt sich die zusammengesetzte PQ-Beziehung für die Brücke. Damit werden die Auswirkungen auf den Wasserspiegel und die Ausuferungen oberstrom abgebildet.

Das Beispiel der Brunaustrassenbrücke an der Sihl zeigt (vgl. Bild 4), dass aufgrund des Rückstaueffekts der rund 50 m unterstrom liegenden Brunaubahnbrücke (SZU) der Wasserspiegel bereits ab einem Abfluss von 420 m³/s an der Brückenunterkante anschlägt. Ohne Rückstau ist dies erst ab einem Abfluss von 550 m³/s der Fall.

Die Anwendungsgrenzen des vorgestellten Ansatzes zur Berücksichtigung der Brücken ergeben sich aufgrund der Vereinfachungen und der vernachlässigten Effekte. Nicht berücksichtigt werden Pulsationserscheinungen und Unstetigkeiten im Abfluss, welche insbesondere beim Übergang in den Druckabfluss und beim Abfluss unter einer Brücke (Schütz) mit geringen Überstauhöhen auftreten ($a/h_0 > 0,75$; Bollrich, 2000). Zudem ist der Einfluss von Brückenpfeilern nur über die reduzierte Lichtraumfläche berücksichtigt, Effekte wie Wellenbildung und der Einfluss auf das Zuschlagen werden vernachlässigt. Eine Unsicherheit besteht auch bei der Verwendung ein-

es flächenäquivalenten Ersatztrapezes, was bei gewissen Lichtraumprofilen (z. B. Bogenbrücken) zu einer starken Vereinfachung der Querprofilgeometrie führen kann. Im Falle von sich gegenseitig beeinflussenden Brücken wird der Einfluss der oberstrom liegenden Brücke auf die unterstrom liegende Brücke vernachlässigt, z. B. Wellenbildung, Turbulenz und Wasserwalzen durch Überströmung. Des Weiteren wird der Rückstau nur bis zum Anschlagen des Wasserspiegels an die Brückenunterkante berücksichtigt. Eine weiterführende Interaktion und gegenseitige Beeinflussung der beiden eingestauten oder überströmten Brücken sind nicht berücksichtigt. Solche Effekte sind mit einem physikalischen Modellversuch oder einer numerischen 3D-CFD-Modellierung detaillierter zu untersuchen. Mit dem vorgestellten Verfahren zur Modellierung der Brücken mit Berücksichtigung des Rückstaueffekts können jedoch die Auswirkungen auf die Ausuferungen sinnvoll abgebildet werden.

4. Modellierung des Sihldurchlasses

4.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Die Sihl unterquert den HB Zürich im Sihldurchlass, welcher aus fünf durch Mauern getrennten Teildurchlässen besteht. Die Länge des Sihldurchlasses beträgt rund 190 m. Die Teildurchlässe haben jeweils eine Breite von 12,0 m und eine Höhe von 3,3 m (ohne Auflandungen). Die Hydraulik und die Kapazität des Sihldurchlasses wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich in Laborversuchen mit mobiler Sohle untersucht (VAW, 2015). Für den Zustand von 2014 wurde bei einem Abfluss der Sihl von 490 m³/s in Kombination mit 190 m³/s Abfluss in der Limmat ein erstes Anschlagen des Wasserspiegels an der Decke im unteren Drittel des Sihldurchlasses beobachtet (Referenzszenario). Bei diesem Versuch ergaben sich im Bereich des Sihldurchlasses mittlere Auflandungen von rund 0,4 m. Die ermittelte Abflusskapazität von 490/190 m³/s (Sihlabfluss/Limmatabfluss) gilt für folgenden Zustand: Auflandungen mit Berücksichtigung einer mobilen Sohle, vorgegebener Limmatabfluss, keine Verkläuerung. Um im numerischen Modell jedoch Szenarien zu Auflandungen, Verkläuerung (n-1-Prinzip: ein Durchlass komplett geschlossen) und Rückstau durch die Limmat zu berücksichtigen, muss der Sihldurchlass mit einem Ersatzmodell abgebildet werden.

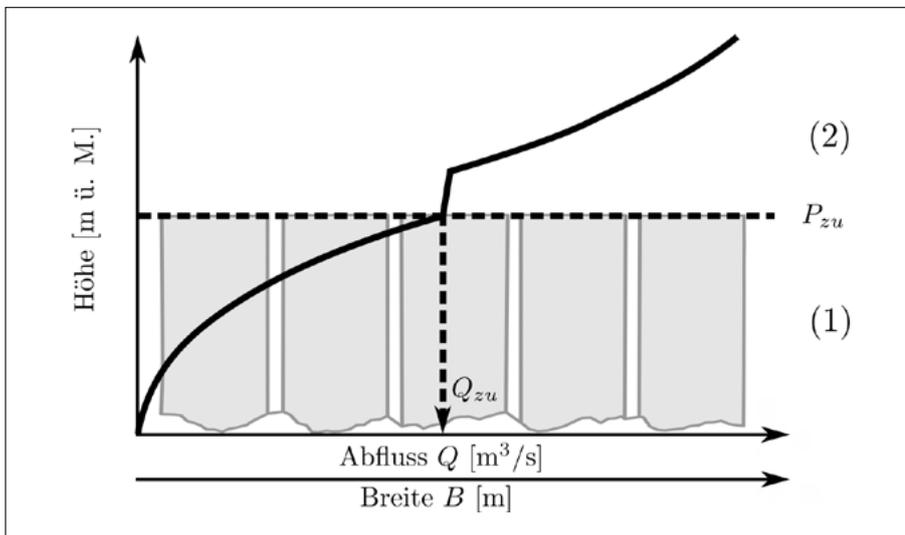


Bild 5: Schematische PQ-Beziehung für den Sihldurchlass mit (1) Freispiegelabfluss bis zum Zuschlagen (Pegel P_{zu} , Abfluss Q_{zu}) und (2) anschliessenden Druckabfluss.

Der Sihldurchlass wird im übergeordneten 2D-Modell als PQ-Beziehung berücksichtigt (vgl. Bild 5). Dabei gilt bis zum Zuschlagen des Durchlasses ein Freispiegelabfluss. Der Freispiegelabfluss wird mit einem lokalen und räumlich hoch aufgelösten 2D-Modell bestimmt und basierend auf den Erkenntnissen des Referenzszenarios (490/190 m³/s) kalibriert. Der an den Freispiegelabfluss anschliessende Druckabfluss basiert auf der Bernoulli-Gleichung und wird anhand der VAW-Überlastfälle und 3D-CFD-Simulationen kalibriert. Für beide Abflusszustände (Freispiegel- und Druckabfluss) werden verschiedene Szenarien berücksichtigt: (i) Auflandung im Bereich des Sihldurchlasses (0,2 m, 0,4 m, 0,6 m), (ii) Verklauung (mittlerer Durchlass geschlossen) und (iii) Rückstauereffekte durch den Abfluss der Limmat über das Platzspitzwehr (TK CONSULT, 2020). Für das letzte Szenario ist im vorliegenden Artikel vor allem die Unterhard-Bedingung von Bedeutung. Diese besagt, dass nach dem Zusammenfluss der Sihl und der Limmat der Abfluss maximal 600 m³/s betragen darf, um den Hochwasserschutz der Unterlieger im Limmattal zu gewährleisten. Der Ausfluss aus dem Zürichsee wird entsprechend über das Platzspitzwehr geregelt. Schliesslich wird für insgesamt 17 Szenarien die Abflusskapazität bestimmt bzw. eine PQ-Beziehung erstellt.

4.2 Freispiegelabfluss

Um die Szenarien für den Freispiegelabfluss beim Sihldurchlass zu modellieren, werden lokale und räumlich hoch aufgelöste 2D-Modelle erstellt. Zuerst wird das Referenzszenario für das Zuschlagen des Durchlasses kalibriert. Dafür wird das Mo-

dell mit 0,4 m Auflandung und 490/190 m³/s Sihlabfluss/Limmatabfluss verwendet. Mit sinnvollen Rauigkeitsbeiwerten nach Strickler (Sohle Durchlass $k_{st}=35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, Sohle Sihl $k_{st}=32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) können Wasserspiegelagen wiedergegeben werden, welche den VAW-Modellversuchen entsprechen – der Wasserspiegel schlägt an der Durchlassdecke im unteren Drittel an. Basierend auf diesem Referenzszenario, wird beim Durchlasseinlauf ein entsprechender Wasserpegel definiert, ab welchem der Durchlass zuschlägt (P_{zu} , vgl. Bild 5). Basierend auf dem kalibrierten Modell, können die verschiedenen Szenarien für den Freispiegelabfluss untersucht werden. Der Übergang vom Freispiegelabfluss in den Druckabfluss ist jeweils vom Szenario abhängig, d.h., der Pegel P_{zu} wird jeweils bei einem anderen Abfluss (Q_{zu}) erreicht.

4.3 Druckabfluss

Für den Druckabfluss beim Sihldurchlass kann die Bernoulli-Gleichung gemäss Bild 6 zwischen dem Einlauf (QP1) und dem Auslauf (QP2) aufgestellt werden:

$$WSP_1 + \frac{v_1^2}{2g} = WSP_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_v, \quad (3)$$

wobei die Subskripte den Kontrollquerschnitt beschreiben (vgl. Bild 6), WSP=Wasserspiegellage (m ü. M.), $v^2/2g$ =Geschwindigkeitshöhe (m) und h_v =Energieverlusthöhe (m). Letztere besteht sowohl aus lokalen Ein- und Auslaufverlusten und aus kontinuierlichen Reibungsverlusten gemäss

$$h_v = \frac{v^2}{2g} \left(\xi_e + \xi_a + n\lambda \frac{L}{D} \right), \quad (4)$$

mit v =Geschwindigkeit im Durchlass, ξ_e = lokaler Einlaufverlustrbeiwert, ξ_a =lokaler Auslaufverlustrbeiwert, λ =Widerstandsbeiwert für Reibungsverluste, L =Länge Durchlass und D =Durchmesser ($D=4 R_h$ mit R_h =hydraulischer Radius), n =Anzahl Durchlässe. Die Reibungsverluste wurden für ein hydraulisch raues Verhalten bestimmt mit

$$\frac{1}{\lambda} = 2 \log \left(3.71 \frac{D}{k_s} \right), \quad (5)$$

wobei k_s die äquivalente Sandrauigkeit beschreibt.

Um eine Pegel-Abfluss-Beziehung beim Einlauf QP₁ (WSP₁-Q-Beziehung) mit Gleichung 3 aufzustellen, müssen v_1 , v_2 und WSP₂ anhand von Vereinfachungen, analytischen Ansätzen oder numerischen Modellen bestimmt werden. Im vorliegenden Fall wurde die Vereinfachung gemacht, dass die Fließgeschwindigkeiten ober-

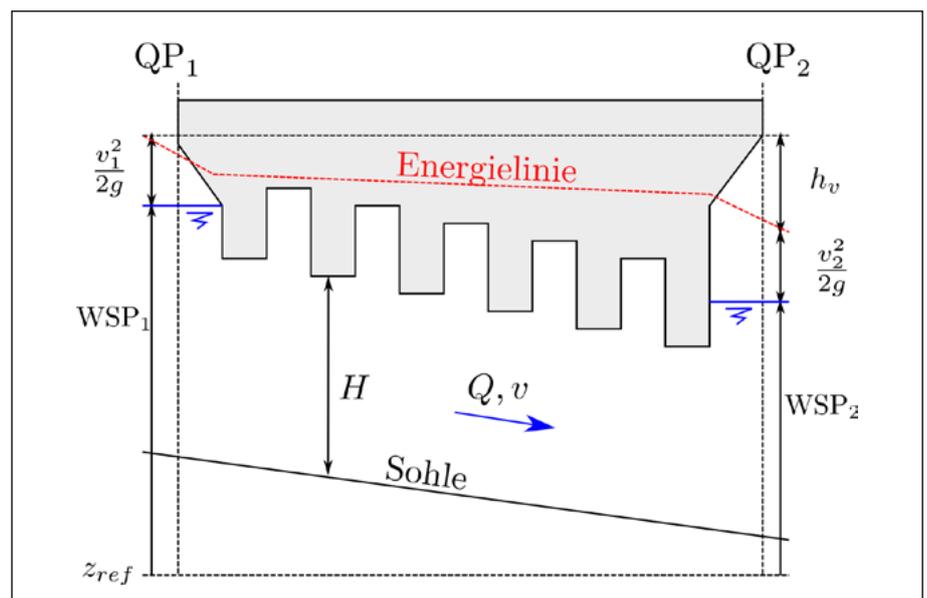


Bild 6: Schematisches Längsprofil beim Sihldurchlass mit den zwei Kontrollquerschnitten QP₁ (Einlauf) und QP₂ (Auslauf).

halb des Einlaufs und unterhalb des Auslaufs gleich gross sind ($v_1 = v_2$). Diese Annahme konnte im übergeordneten numerischen 2D-Modell auch bei eingestautem Durchlass bestätigt werden ($v_1 \approx v_2$). Der Wasserspiegel WSP_2 wird unter Berücksichtigung des Rückstau effekts durch die Limmat über eine PQ-Beziehung beim Auslauf (WSP₂-Q-Beziehung) aus dem lokalen 2D-Modell bestimmt.

Mit diesem Ansatz ergibt sich der Abfluss durch den Sihldurchlass gemäss

$$Q = A \sqrt{\frac{2g(WSP_1 - WSP_2)}{\xi_e + \xi_a + n\lambda L/D}}, \quad (6)$$

mit A =gesamter Durchlassquerschnitt ($A=n \cdot B \cdot H$). Daraus lässt sich beim Einlauf des Durchlasses eine Pegel-Abfluss-Beziehung (WSP₁-Q-Beziehung) unter Berücksichtigung des Rückstau effekts durch

den Limmat abfluss (WSP₂-Q-Beziehung) iterativ erstellen.

4.4 Plausibilisierung und Kalibrierung

Die erstellten PQ-Beziehungen werden, basierend auf verschiedenen Ansätzen, plausibilisiert und kalibriert. Der Übergang von Freispiegel- auf Druckabfluss (Q_{zu}) kann mit dem vereinfachten Ansatz nach Hager (1995) gemäss

$$Q_{zu} = 0.61 \sqrt{9.81 D^5} \quad (7)$$

abgeschätzt werden. Obwohl damit Rückstau effekts der Limmat nicht berücksichtigt werden, kann der Ansatz zur Plausibilisierung der erstellten PQ-Beziehungen, insbesondere für den Übergang in den Druckabfluss, herangezogen werden. Q_{zu} gemäss Gleichung 7 gilt für einen Teildurchlass und wird für den gesamten Abfluss

mit der Anzahl Teildurchlässe (n) multipliziert.

Weiter wird für den Sihldurchlass ein 3D-CFD-Modell erstellt, um neben den physikalischen Modellversuchen der VAW eine zusätzliche Kalibrierungsgrundlage für die PQ-Beziehungen im Überlastfall zu schaffen. Mit dem InterFoam Solver der Software OpenFoam (Version v1712) wird eine zweiphasenströmung (Wasser-Luft) mit der Volume-of-Fluid-Methode (VOF-Methode) numerisch gelöst. Die Kalibrierung erfolgt anhand des vorher beschriebenen Referenzzustands, bei welchem der Sihldurchlass bei einem Abfluss von 490/190 m³/s (Sihlabfluss/Limmat abfluss) im unteren Drittel zuschlägt. Anschliessend werden mit dem kalibrierten 3D-CFD-Modell zwei Überlastfälle (540/60 m³/s und 650/0 m³/s) simuliert (vgl. Bild 7 und Bild 8).

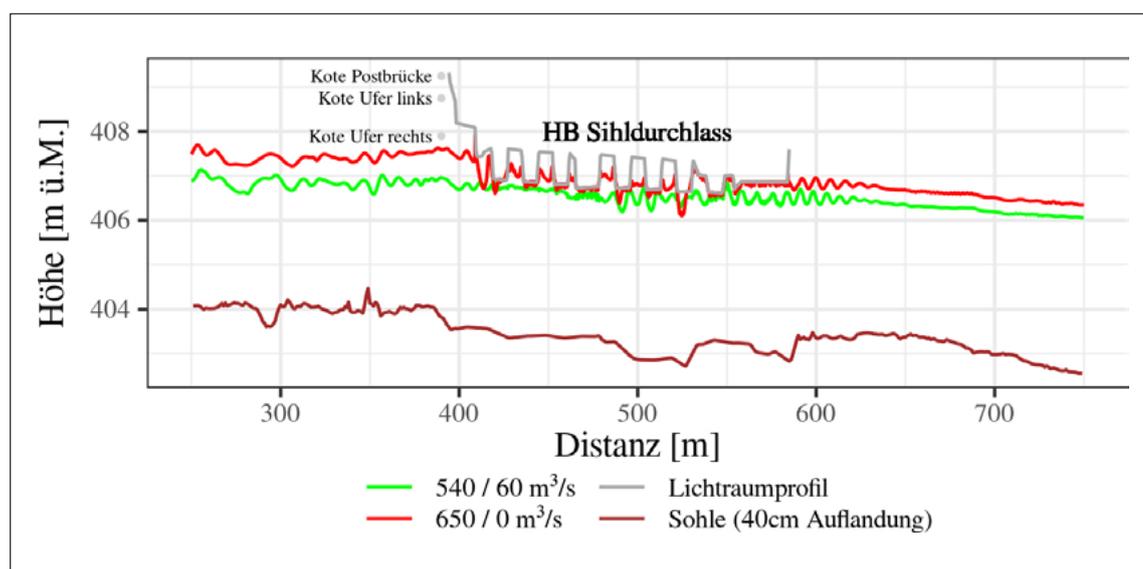


Bild 7: Längsprofil 3D-Modellierung für die beiden Überlastfälle (540/60 m³/s und 650/0 m³/s) entlang der Flussachse durch den mittleren Durchlass.

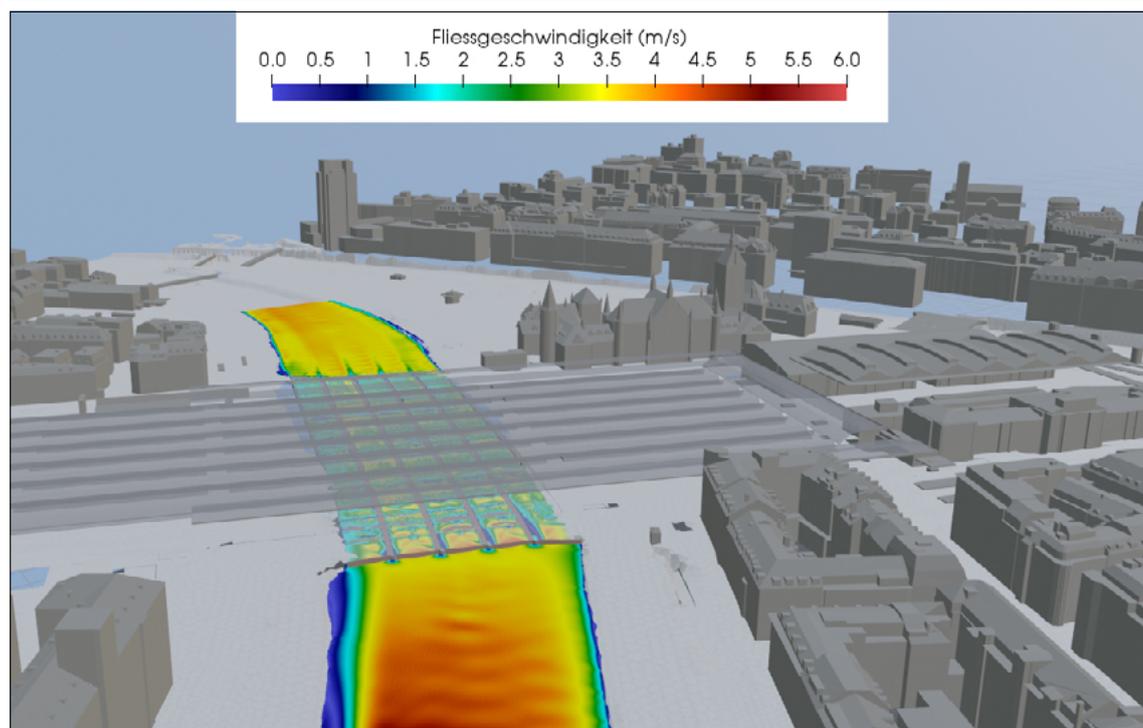


Bild 8: Fließgeschwindigkeiten (an der Wasseroberfläche) beim Überlastfall (650/0 m³/s) der 3D-CFD-Simulation beim Sihldurchlass mit 3D-Stadtmodell (Blick in Fließrichtung).

Für die Kalibrierung der PQ-Beziehungen werden ebenfalls Ergebnisse aus den Überlastfällen der VAW-Laborversuche (VAW, 2015) verwendet. Diese basieren auf dem Zustand des Durchlasses aus dem Jahre 2014 und wurden mit mobiler Sohle durchgeführt. Im vorliegenden Projekt wird der aktuelle Zustand des Durchlasses aus dem Jahre 2018 (Meisser, 2018) verwendet. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der VAW-Versuche ist somit nur qualitativ möglich. Dennoch stellen die Ergebnisse der Laborversuche wichtige Anhaltspunkte dar und liefern zudem wichtige Erkenntnisse bezüglich der Auflandungshöhen und Auflandungsbereiche. Darauf stützend, konnten die Auflandungsszenarien mit den entsprechenden Auflandungshöhen definiert werden.

Basierend auf den Anhaltspunkten aus den Überlastfällen der VAW-Laborversuche und den 3D-CFD-Simulationen, kann der analytische Ansatz für den Druckabfluss kalibriert werden (vgl. Bild 9). Die Kalibrierung im Überlastfall wird mit dem Szenario

mit 0,4 m Auflandung und ohne Verklauung durchgeführt. Dieses Szenario (Topografie 2018 mit den mittleren Auflandungen von 0,4 m) entspricht von allen untersuchten Szenarien am ehesten der Topografie 2014 und den beobachteten Auflandungen aus den VAW-Laborversuchen. Der Abfluss der Limmat wird unter Einhaltung der Unterhard-Bedingung zugegeben, wobei für Sihlabflüsse $> 600 \text{ m}^3/\text{s}$ der Limmatabfluss ganz abgestellt wird. Die 3D-CFD-Simulationen werden mit den gleichen Abflüssen (Sihl/Limmat), Szenarien und Topografie (2018) wie das lokal erstellte 2D-Modell durchgeführt. Bei den VAW-Laborversuchen sind die Abflüsse (Sihl/Limmat) ebenfalls identisch, jedoch sind, wie bereits erwähnt, die Auflandungen (bewegliche Sohle) und die Topografie nicht exakt identisch (Topografie 2014).

Die für den Kalibrierungsfall erstellte PQ-Beziehung weist zwischen 0,3 und 0,6 m höhere Wasserspiegel auf als die VAW-Laborversuche und 3D-CFD-Simulationen (Bild 9). Die VAW-Laborversuche und die

3D-CFD-Simulationen liegen im Bereich der Energielinie des Freispiegelabflusses aus dem lokalen 2D-Modell ohne Zuschlagen des Sihldurchlasses (vgl. Bild 9). Es erscheint jedoch plausibel, dass im Falle eines Zuschlagens und Druckabflusses der Wasserspiegel aufgrund der lokalen und kontinuierlichen Energieverluste höher liegt als die Energielinie des Freispiegelabflusses (ohne Zuschlagen des Sihldurchlasses). Im Rahmen der Kalibrierung der PQ-Beziehung musste zudem berücksichtigt werden, dass sich auch für alle anderen 16 Szenarien eine sinnvolle analytische Lösung für den Druckabfluss und ein plausibler Übergang von Freispiegel- auf Druckabfluss (Q_{zu}) ergibt. Der analytische Ansatz wurde mit physikalisch sinnvollen Parametern erstellt und liegt im Vergleich zu den VAW-Laborversuchen und 3D-CFD-Simulationen auf der sicheren Seite.

4.5 Resultierende PQ-Beziehungen

Für die 17 Szenarien wird jeweils eine PQ-Beziehung des Sihldurchlasses erstellt. Da-

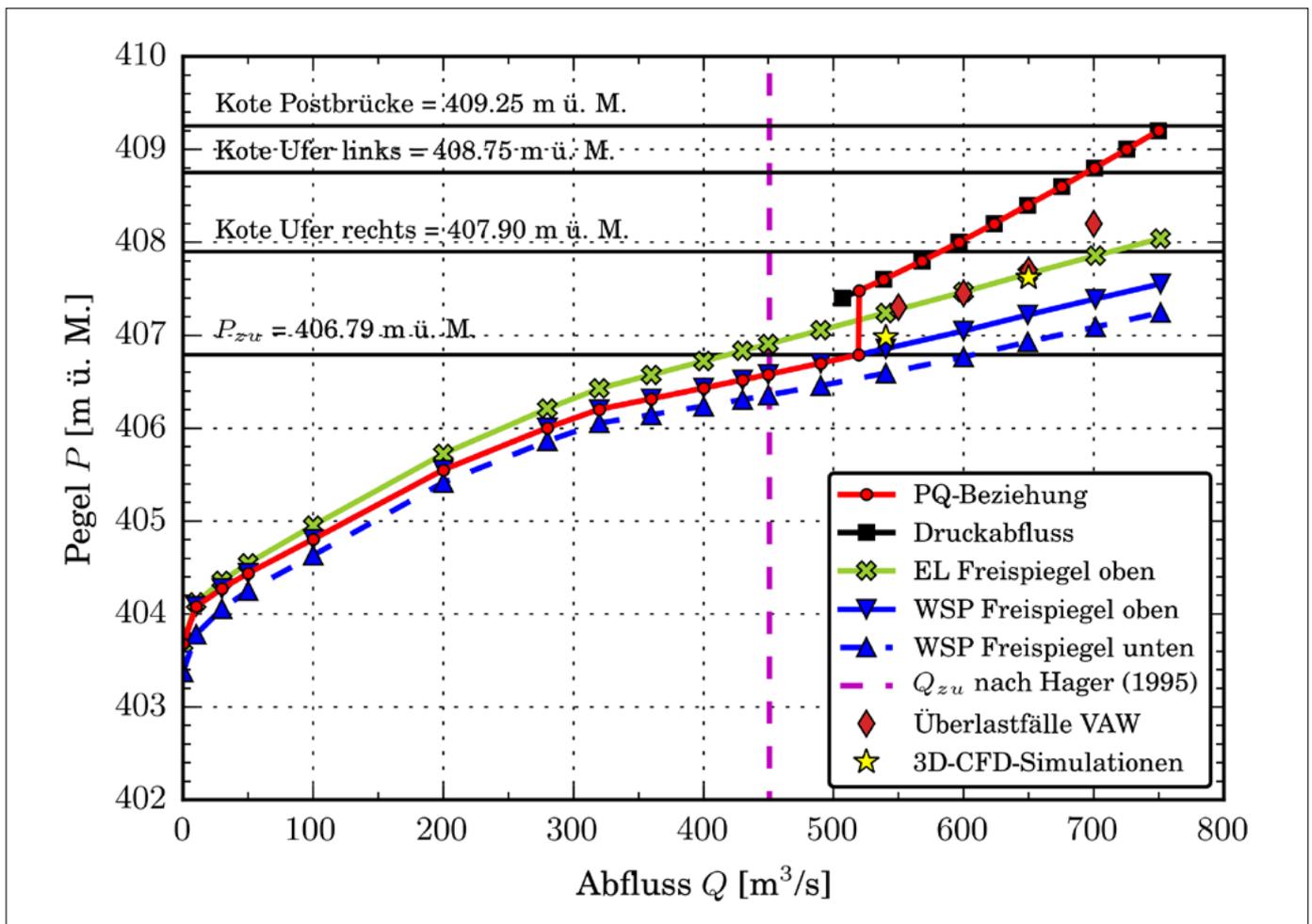


Bild 9: PQ-Beziehung des Sihldurchlasses unter Berücksichtigung von Druckabfluss (Kapitel 4.3) für das Szenario mit 0,4 m Auflandung, ohne Verklauung und Einhaltung der Unterhardbedingung (Abfluss Sihl und Limmat zusammen maximal $600 \text{ m}^3/\text{s}$). Als Anhaltspunkte sind die Überlastfälle der VAW, 3D-CFD-Simulationen und Q_{zu} gemäss Ansatz nach Hager (Gleichung 7) dargestellt. Die Energielinie (EL) und der Wasserspiegel (WSP) oben/unten für den Freispiegelabfluss stammen aus dem lokalen 2D-Modell.

von ist ein resultierendes Szenario in *Bild 9* dargestellt (0,4 m Auflandung, ohne Verkläuerung und Limmatabfluss mit Unterhard-Bedingung). Die Abflusskapazitäten, bei welchen der Durchlass zuschlägt, variieren, über alle Szenarien betrachtet, zwischen 371 und 568 m³/s. Zum Beispiel liegt im Referenzszenario die Abflusskapazität von 490/190 m³/s Sihlabfluss/Limmatabfluss (Unterhard-Bedingung nicht eingehalten) aufgrund eines stärkeren Rückstaueffekts der Limmat etwas tiefer als beim Szenario, bei welchem die Unterhard-Bedingung eingehalten wird (Abflusskapazität von 519/81 m³/s). Mit den erstellten PQ-Beziehungen kann der Einfluss auf die Ausuferungen und Überflutungsflächen untersucht werden. Im nächsten Kapitel wird auf einige Beispiele eingegangen.

5. Einfluss auf Überflutungsflächen

Der Einfluss der vorgestellten Ansätze auf die Überflutungsflächen soll exemplarisch anhand der Brücken aufgezeigt werden. Die Sensitivitätsanalysen und die nachfolgend aufgezeigten Simulationsergebnisse basie-

ren auf dem Nettoprinzip, bei dem die ausgeferte Wassermenge unterhalb der Ausbruchsstelle nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Berücksichtigung der Brücken hat einen grossen Einfluss auf die Überflutungsflächen auf dem Schwemmkegel der Sihl. Es stellte sich heraus, dass Altstetten bereits ab einem HQ300 überflutet wird (*vgl. Bild 10*). Im Vergleich dazu würde ohne Berücksichtigung der Brücken Altstetten erst ab einem EHQ überflutet. Hauptverantwortlich sind die Brücken in der Brunau (SZU-Bahnbrücke und Strassenbrücke), welche bereits ab einem Abfluss von 330 m³/s bzw. 420 m³/s zuschlagen und in Druckabfluss übergehen (*vgl. Bild 4*). Dies hat zur Folge, dass während der Hochwasserspitze in der Brunau eine grössere Wassermenge ausfert und über Wiedikon und den Seebahnausschnitt in Richtung Altstetten fließen kann. Aufgrund dessen gelangt beim Nettoprinzip weniger Wasser zum Sihldurchlass beim Hauptbahnhof.

6. Schlussfolgerungen

Oft sind Bauwerke wie Brücken oder Durchlässe im Hochwasserereignis verantwort-

lich für Aufstau, Rückstau und daraus folgende Ausuferungen. Im vorliegenden Beitrag werden Ansätze vorgestellt, um solche Bauwerke mittels PQ-Beziehungen als innere Randbedingungen in hydraulischen 2D-Modellen zu berücksichtigen.

Der vorgeschlagene Ansatz für Brücken berücksichtigt einen Freispiegelabfluss, ein Zuschlagen mit anschliessendem Druckabfluss und ein Überströmen der Brücke. Die Wahl der Parameter für die vorgeschlagenen Ansätze lässt sich auf Literaturangaben stützen (*USDA, 2012; Schall et al., 2012*). Auf dem Schwemmkegel der Sihl wird exemplarisch aufgezeigt, dass sich Brücken sensitiv auf den Überflutungsprozess auswirken.

Die PQ-Beziehungen beim Sihldurchlass berücksichtigen den Freispiegelabfluss, den Druckabfluss und verschiedene Szenarien zu Auflandung, Verkläuerung und Rückstauereffekt der Limmat. In den meisten Fällen stehen keine Ergebnisse aus Laborversuchen zu Verfügung. 3D-CFD-Simulationen stellen ein geeignetes Werkzeug dar, um eine Grundlage für die Kalibrierung von PQ-Beziehungen zu schaffen.

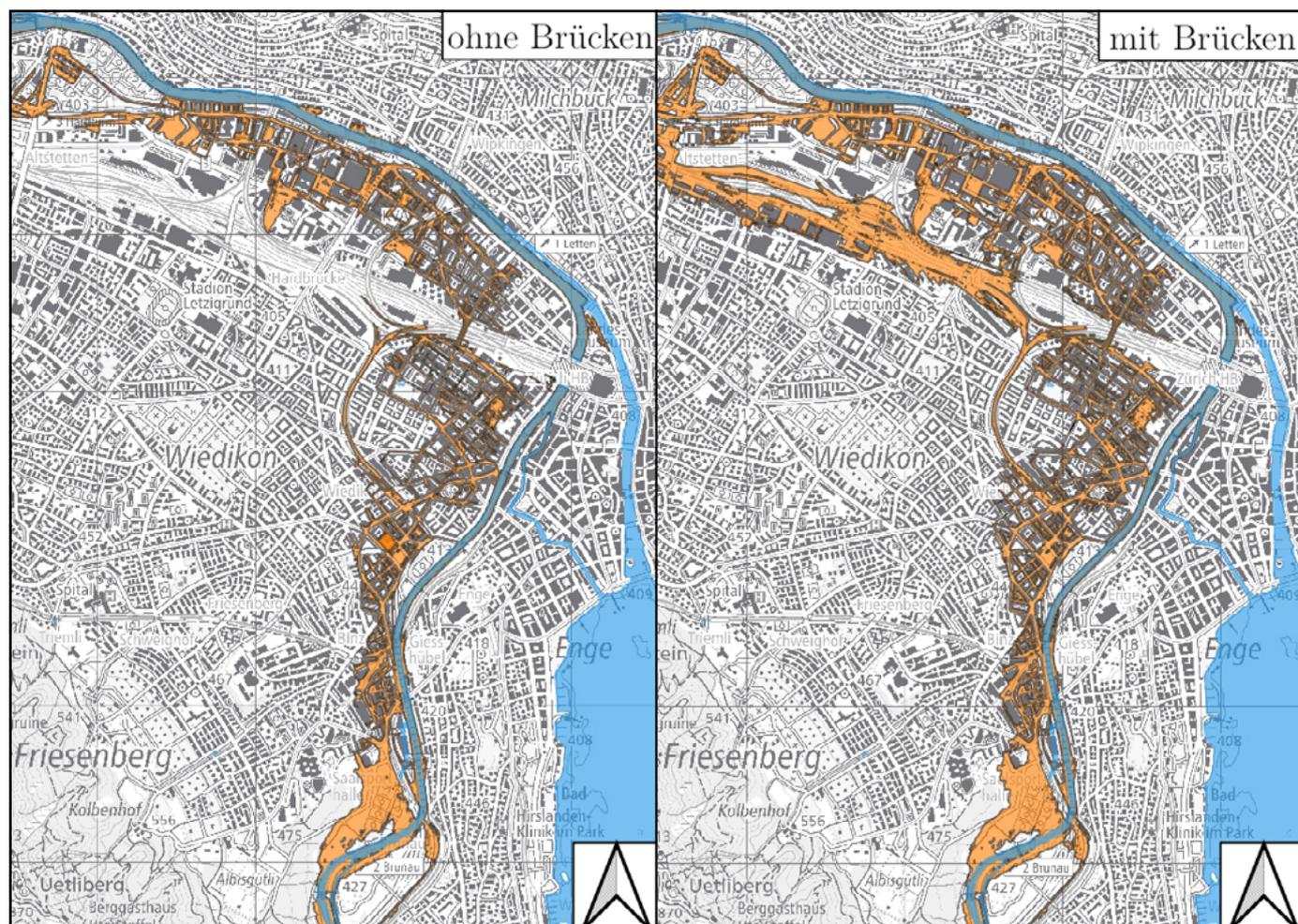


Bild 10: Überflutungsflächen (orange) auf dem Schwemmkegel der Sihl bei einem HQ300 (540 m³/s, Nettoprinzip) ohne Berücksichtigung der Brücken (links) und mit Berücksichtigung der Brücken (rechts).

Anhand von PQ-Beziehungen lassen sich Bauwerke wie Brücken oder Durchlässe eindeutig und explizit hydraulisch definieren. Zudem können damit Szenarien ab-

geleitet und entsprechend dokumentiert werden. Im Rahmen von 2D-Überflutungssimulationen bieten sich damit Sensitivitätsanalysen an, um einerseits das System-

verständnis zu verbessern und andererseits eine Grundlage zu schaffen, um die massgebenden Projektszenarien zu definieren.

Quellen:

AWEL (2017). Hochwasserschutz an Sihl, Zürichsee und Limmat, Gefährdung und Massnahmen im Überblick, Oktober 2017, Kanton Zürich, Baudirektion, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. Version 3.0. © ETH Zurich, VAW, 2019.
Bollrich, G. (2000). Technische Hydromechanik, Band 1, Grundlagen, 5. Auflage, Verlag Bauwesen, Berlin
Hager W. H. (1995). Abwasserhydraulik: Theorie und Praxis, Springer Verlag
Meisser (2018), Vermessung der Sihldurchlässe und Sihl im Bereich des Hauptbahnhofs, Meisser Vermessungen AG
USDA (2012). Hydrology National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 14, Stage Discharge Relations, U.S. Department of Agriculture (USDA)
Schall, J. D., Thompson, P. L., Zerges, S. M., Kilgore, R. T., Morris, J. L. (2012). Hydraulic Design of Highway Culverts, Third Edition, U.S. Department of

Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HIF-12-026, Hydraulic Design Series Number 5
TK CONSULT (2020). 2D-Simulationen Schwemmkegel Sihl Stadt Zürich, Prozess Hochwasser, Technischer Bericht, Auftraggeber: Schweizerische Bundesbahn AB (SBB AG), Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL), Bericht im Entwurf [25.06.2020]
VAW (2015). Sihldurchlässe Hauptbahnhof Zürich, Hydraulische Modellversuche. Technischer Bericht, VAW Nr. 4308, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
Vetsch D., Siviglia A., Bacigaluppi P., Bürgler M., Caponi F., Conde D., Gerke E., Kammerer S., Koch A., Peter S., Vanzo D., Vonwiller L., Weberndorfer M. 2019. System Manuals of BASEMENT, Version 3.0, Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich, www.basement.ethz.ch [30.03.2020]

Autoren:

Dr. Lukas Vonwiller
TK CONSULT AG, lukas.vonwiller@tkconsult.ch
Michel Kuhlmann
TK CONSULT AG, michel.kuhlmann@tkconsult.ch
Mattias Deller
TK CONSULT AG, mattias.deller@tkconsult.ch
Steffen Corbe
TK CONSULT AG, steffen.corbe@tkconsult.ch
Dr. Matthias Oplatka
Sektion Bau, Abteilung Wasserbau, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zürich, matthias.platka@bd.zh.ch
Dr. Marc Hauser
Natur und Naturrisiken, Infrastruktur, Schweizerische Bundesbahn AG (SBB), marc.hauser@sbb.ch



Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

zhaw Life Sciences und Facility Management
IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

CAS Süßwasserfische Europas

Ökologie & Management

Start: 12. März 2021

www.zhaw.ch/iunr/fische