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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 108 (2016)

Heft: 4

Artikel: Verifizierung von Pegel-Abfluss-Beziehungen an Messstationen im Kanton Aargau

Autor: Farshi, Davood / Lienert, Christophe

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939537

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 03.02.2026

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

Verifizierung von Pegel-Abfluss-Beziehungen an Messstationen im Kanton Aargau

Davood Farshi, Christophe Lienert

Zusammenfassung

Pegel-Abfluss-Beziehungen (PQ-Beziehungen) bei Schweizer Gewässern werden i. d. R. aus Eichmessungen des Abflusses hergeleitet, welche aus technischen und Sicherheitsgründen oftmals nur bei niedrigen oder mittleren Abflüssen durchgeführt werden. Für die höheren Abflüsse müssen die PQ- Beziehungen unter bestimmten Voraussetzungen extrapoliert werden, und sie sind nur unzureichend mit Abflussmessungen belegt. Die Unsicherheiten der PQ-Beziehungen bei Hochwasserabflüssen beeinträchtigen massgeblich andere Themenbereiche wie Bemessung von Hochwasserschutzbauten oder die Gefahrenkarten. Unter anderem aus diesem Grund spielen gut fundierte PQ-Beziehungen im oberen Abflussspektrum eine bedeutende Rolle.

Die PQ-Beziehungen der hydrometrischen Stationen Suhre-Unterentfelden, Suhre-Suhr und Wyna-Suhr des Kantons Aargau wurden aus diesem Grund im Rahmen eines Pilotprojekts mittels detaillierten hydraulischen zweidimensionalen (2D) Modellierungen bei Hochwasserabflüssen untersucht. Für die hydraulischen Modellierungen wurde ein hochaufgelöstes und anhand der bestehenden Eichmessungen kalibriertes 2D-Modell erstellt.

Die Resultate zeigen, dass die bestehende PQ-Beziehung der Station Unterentfelden gut mit den Berechnungen übereinstimmt. Die PQ-Beziehung der anderen Stationen weichen dagegen – zwar geringfügig – von den Berechnungen ab. Bei der Station Suhr übersteigt die PQ-Beziehung die Pegel für Hochwasserabflüsse, wohingegen die PQ-Beziehung der Station Wyna die Pegel für solche Abflüsse ab HQ_{10} unterschreitet. An diesen zwei Stationen können dank den Erkenntnissen aus der 2D-Modellierung geringfügige Anpassungen vorgenommen werden; dadurch wird insgesamt die Qualität der Aussagen zu Hochwasserabflüssen gesteigert.

1. Einleitung

Der Fachbereich Hydrometrie des Kantons Aargau ist verantwortlich für die Erhebung verschiedener Messgrössen der Oberflächengewässer des Kantons. Dazu gehören Pegelstände und daraus mittels PQ-Beziehungen berechnete Abflussmengen. Die Bestimmung der PQ-Beziehung wiederum erfolgt aus Abflussmessungen, welche mit unterschiedlichen Messmethoden, wie Flügelmessungen, oder neuartigen Techniken, wie dem Accoustic Doppler Current Profiler (ADCP), oder Webkameras erfolgen (*Lienert*, 2016). Bei Abflussverhältnissen, welche eine fachgerechte Durchführung einer Eichmessung erlauben, können so die Abflüsse gewöhnlicherweise zuverlässig bestimmt werden.

Bei Hochwasser ist die Durchführung einer Abflussmessung wegen der kurzen Dauer und der Heftigkeit des Ereignisses oft nicht möglich. Entweder trifft man zeitlich die Hochwasserspitze nicht, oder aber die messtechnischen Bedingungen beeinträchtigen die Arbeitssicherheit so, dass eine Hochwassermessung nicht durchführbar ist. Entsprechend sind die PQ-Beziehungen besonders im Hochwasserbereich nicht immer ausreichend mit Abflussmessungen belegt, sondern müssen extrapoliert werden. Aus diesem Grund wurde die Frage gestellt, ob detaillierte numerische Modelle für die Extrapolation der PQ-Beziehungen eingesetzt werden und die durch die Extrapolationen hervorgerufenen Unsicherheiten im oberen Abflussbereich vermindern können. Im Rahmen eines Pilotprojekts wurden detaillierte hydraulische, zweidimensionale (2D) Modellierungen für die drei Messstationen Suhre-Unterentfelden, Suhre-Suhr und Wyna-Suhr bei Hochwasserabflüssen durchgeführt und dokumentiert. Die Suhre fliesst durch teilweise dicht besiedeltes Gebiet vom Sempachersee bis in die Aare unterhalb von Aarau. Bei der Gemeinde Suhr fliesst die Wyna in die Suhre. Die Lage der Messstationen sind in *Bild 1* dargestellt.

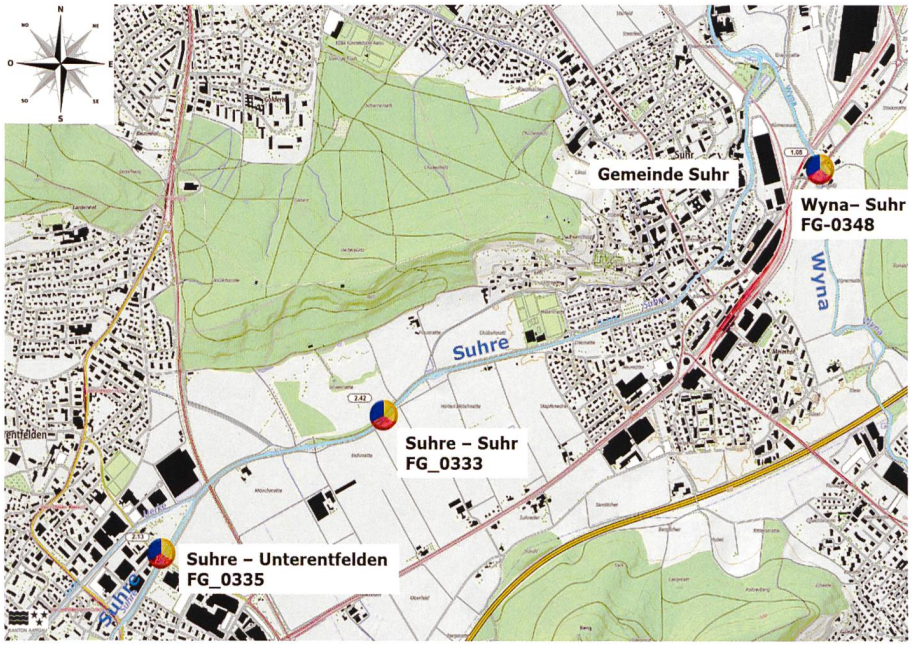

Bild1. Die Lage der Messstationen Unterentfelden, Suhr und Wyna.

Die Pegel an den Stationen Unterentfelden und Wyna werden mittels einer Radarmessung und einer redundanten Drucksondenmessung digital aufgenommen. Bei der Station Suhr erfolgt die digitale Pegelaufzeichnung ausschliesslich mit einer Drucksonde. Die Messstellen befinden sich einige Meter oberhalb von eigens für die Messstationen angelegten Gerinneschwellen. Unterhalb der Station Wyna befindet sich die Bogenbrücke der Bernstrasse Ost (K 235).

Im Gegensatz zur Station Suhr verfügen die Stationen Unterentfelden und Wyna über hydrometrische Messstege. Diese vereinfachen die für die PQ-Beziehung benötigten regelmässigen Eichmessungen, insbesondere bei hohen Wasserständen. Bei der Station Suhr existiert keine solche Vorrichtung, weshalb auf eine denkmalgeschützte Holzbrücke weiter oben ausgewichen werden muss, was jedoch aus messtechnischer Sicht nicht optimal ist.

2. Vorgehensweise

Die Untersuchung der Messstationen bei den Hochwasserabflüssen mittels eines 2D-Modells wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

a) Berechnungsnetz

Für die Modellierungen wurde in einem ersten Schritt ein detailliertes Berechnungsnetz erstellt, das den Flussschlauch und die Vorländer beinhaltet. Das Berechnungsnetz wurde auf der Basis der vorhandenen topographischen Grundlagen (Querprofile, DTM sowie Ausführungspläne der unlängst ausgeführten Revitalisierungsarbeiten) aufgebaut. Für den Fall, dass das Wasser über das Ufer austritt, wurden die nahe am Fluss stehenden Häuser aus dem Netz ausgeschnitten.

Die Bodenbeschaffenheit wurde aus Luftbildern und örtlichen Begehungen ermittelt; daraufhin wurden die Rauhigkeitszonen definiert.

b) Kalibrierung und Validierung

Das numerische Modell wurde durch die Simulation der Eichmessungen mit der Optimierung der Rauhigkeitsbeiwerte, sowie genauerer Deskritisierung des Geländes, der Brücken und der Schwellen für die jeweiligen Rauhigkeitszonen kalibriert und validiert. Die dabei zulässige Abweichung der berechneten Werte zu den Eichmessungen wurde auf kleiner als 5 % festgelegt.

c) Simulation

Das kalibrierte Berechnungsmodell wurde für die Modellierungen des oberen Abflussspektrums eingesetzt (Abflüsse grösser als HQ_2). Die erzielten Resultate wurden dann auf ihre Plausibilität hin geprüft, d. h., darauf, ob die berechneten Strömungsverhältnisse unter den gegebenen Bedingungen aus hydraulischer Sicht sinnvoll sind.

3. Grundlagen

Für die Modellierung wurden folgenden Daten gesammelt und nach einer Qualitätsprüfung, z. B. Überprüfung der Vollständigkeit und Aktualität der Daten, verwendet:

3.1 Topographische Daten

Für die Topographie lagen folgende Daten zur Verfügung:

1) Querprofile von Suhre und Wyna, aufgenommen 2006 bzw. 2009 mit den Abständen bis zu 500 m
2) Querprofilaufnahmen (2006, 2007, 2009 und 2015) in kurzen Abständen im Bereich der Messstationen Unterentfelden und Suhr
3) Querprofilaufnahmen von 2012 sowie Uferaufnahmen im Bereich des Mitteldorfs Suhr
4) Im Jahr 2016 während der Bearbeitung des Projekts aufgenommene Querprofile der Wyna
5) Digitales Geländemodell der Swisstopo (swissALTI3D 2015) mit einem Mindestabschnitt von 2 m, welches die Geländeformen ohne Bewuchs und Bebauung zeigt.

Bild 2. Vorhandene Querprofile von Suhre und Wyna.

6) Ausführungspläne der revitalisierten Strecke (2015) der Suhre in einer Länge von ca. 300m.

Die vorhandenen Querprofile sind im *Bild 2* dargestellt.

3.2 Hydrologie

Die Hochwasserstatistik des Fachbereichs Hydrometrie des Kantons Aargau diente als Grundlage für die vorliegende Modellierung. Diese ermittelt die Hochwasserabflüsse mit bestimmter Eintrittshäufigkeit (Jährlichkeit) für die drei untersuchten Messstationen anhand der langjährigen dort erhobenen Messdaten *(Tabelle 1)*.

3.3 Pegel- und Abflusswerte

Die PQ-Beziehung wird, wie oben erwähnt, aus Eichmessungen des Abflusses hergleitet, welche mit unterschiedlichen Messmethoden, insbesondere aber Flügelmessungen, erfolgen. An den untersuchten Messstationen wurden die Eichmessungen allerdings in den meisten Fällen für niedrige und mittlere Abflüsse durchgeführt. Aus den vorhandenen Messwerten wurden diejenigen ausgewählt und für die vorliegende Studie verwendet, deren Unsicherheiten als gering eingestuft wer-

Station	HQ_2	HQ_{10}	HQ_{30}	HQ_{50}	HQ_{100}
Unterentfelden	17.8	28.7	35.4	38.4	42.4
Suhr	25.3	36.8	43.9	47.2	51.7
Wyna-Suhr	25.5	38.6	45.7	48.7	52.7

Tabelle 1. Hochwasserabflüsse der untersuchten Messstationen (m^3/s, (Beobachtungsperiode bis 2014).

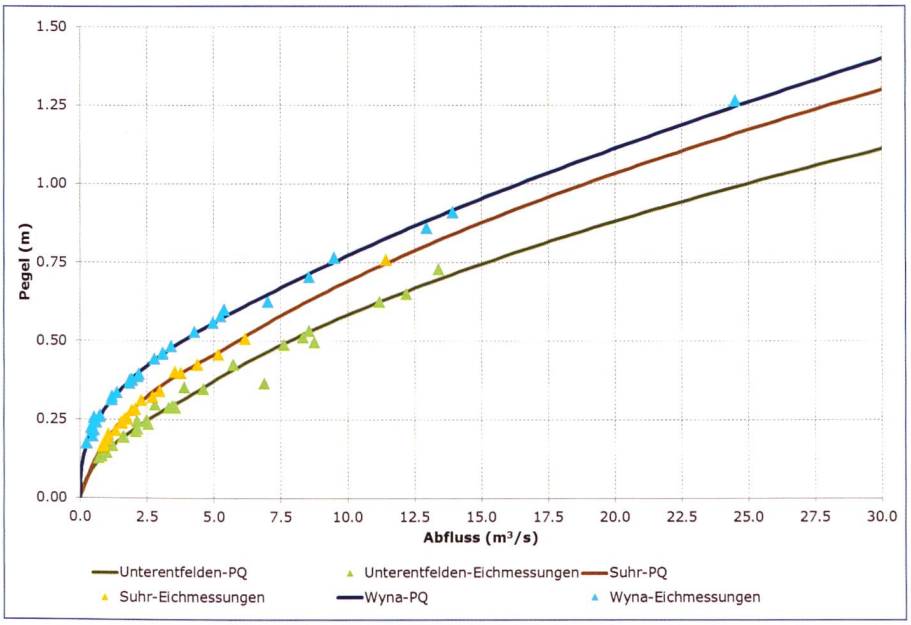

Bild 3. Eichmessungen und zugehörige PQ-Beziehungen der Messstationen.

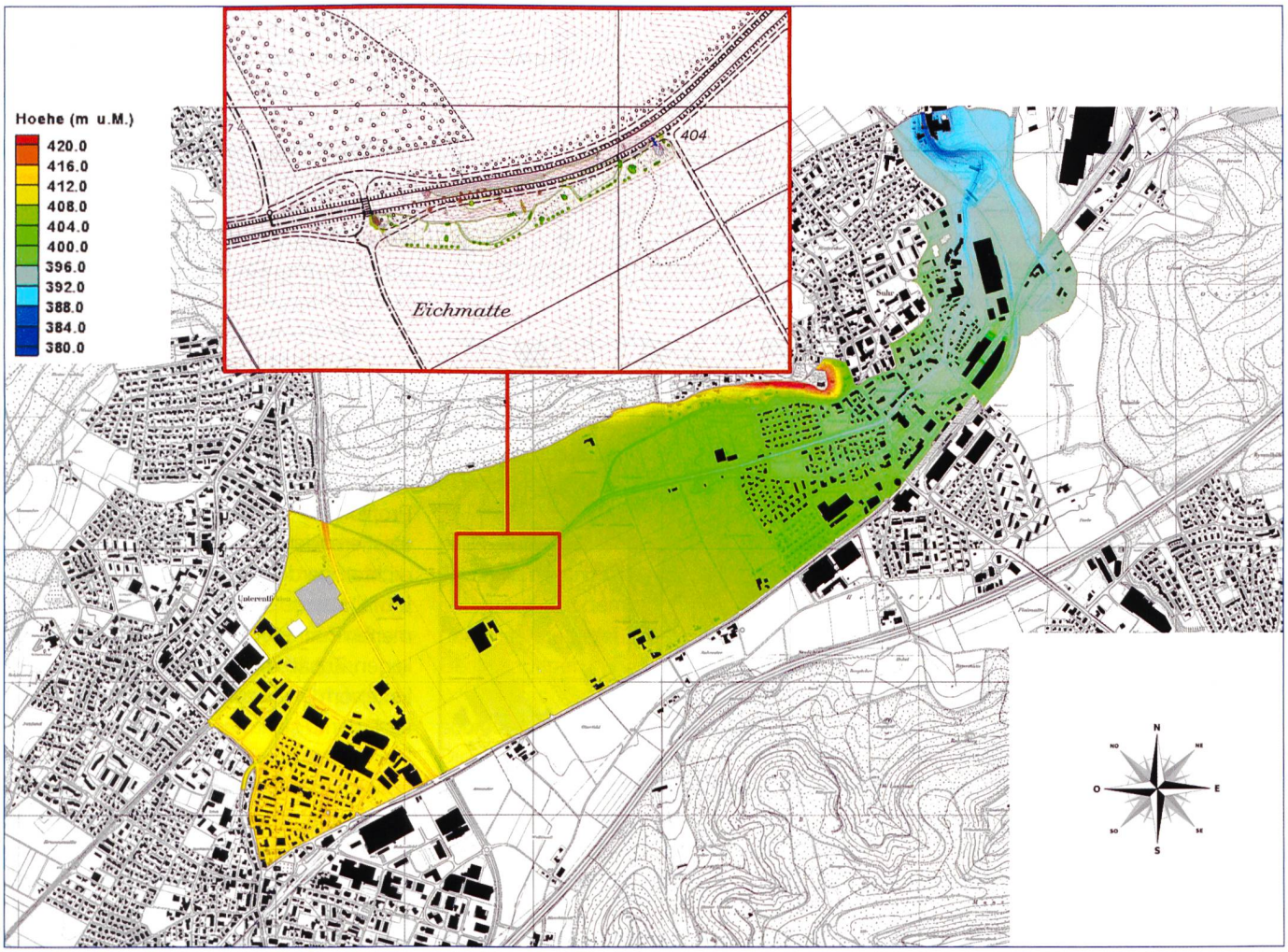

Bild 4. Das verwendete Gesamtnetz für die Berechnungen.

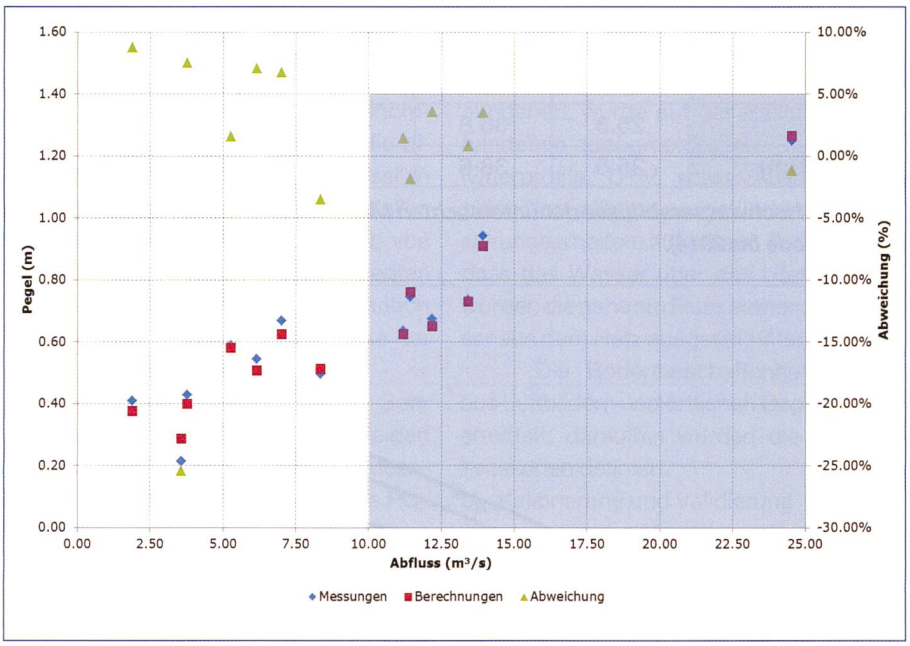

Bild 5. Darstellung der Kalibrierungswerte (blaues Feld: die Abflüsse über 10 m³/s mit den Abweichungen unter 4 %).

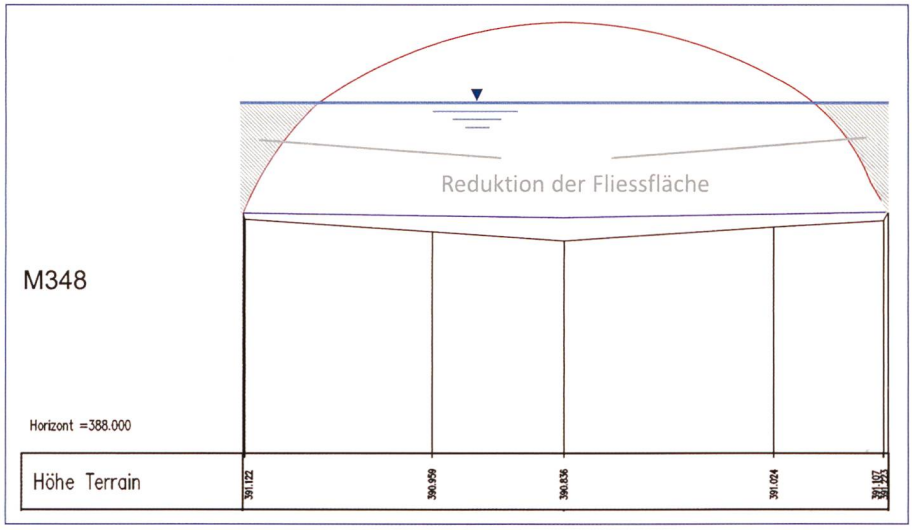

Bild 6. Reduktion der Fliessfläche durch die Bogenbrücke.

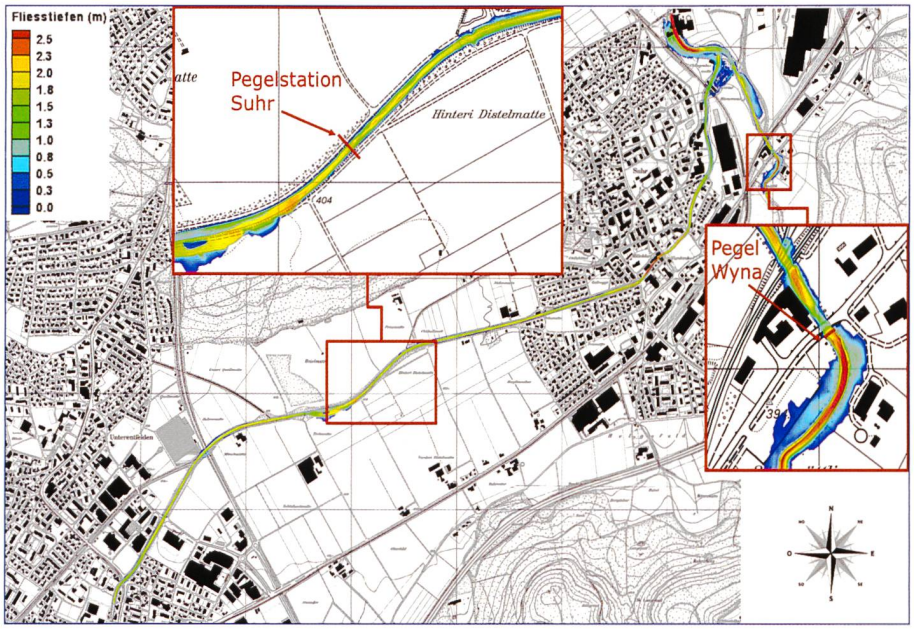

Bild 7. Berechnete Fliesstiefen für ein HQ_{50} an den Stationen Suhre-Suhr und Wyna-Suhr.

den. In *Bild 3* sind die ausgewählten Eichmesswerte und die daraus resultierenden PQ-Beziehungen dargestellt. Wie aus den PQ-Beziehungen hervorgeht, sind diese im Hochwasserbereich nicht ausreichend mit Abflussmessungen/-daten belegt. Einzig bei der Station Wyna-Suhr liegt eine Eichmessung für den Abfluss 24.52 m³/s vor, was etwa einem HQ_2 entspricht.

4. Grossräumige 2D-Modellierung

Für die hydraulischen 2D-Modellierungen wurde die Software BASEMENT (*BASEMENT,* 2016) verwendet. BASEMENT wurde an der VAW der ETH Zürich (ETHZ) entwickelt. Das in BASEMENT integrierte Verfahren basiert auf der hochpräzisen numerischen Lösung der 2D-tiefengemittelten Flachwassergleichungen («Shallow Water Equations», (*Tan,* 1992) mit der räumlichen Diskretisierung nach der Finiten-Volumen-Methode (FVM, *LeVeque,* 2002). Die Software verwendet ein aus Drei- und Viereckelementen bestehendes Berechnungsnetz. Die Verwendung eines solchen Netzes gestattet eine genaue Anpassung an die topographischen und hydrodynamischen Gegebenheiten der jeweiligen Aufgabenstellung. BASEMENT ist deshalb ein geeignetes Programm für die Berechnung von Strömungen in natürlichen Gewässern. Für die Erstellung und Bearbeitung des Berechnungsnetzes und die Darstellung der Resultate wurde das Programm SMS (*SMS,* 11.2) verwendet.

4.1 Berechnungsnetz

Das Berechnungsnetz wurde in folgenden Schritten aufgebaut:

- Diskretisierung des Flussschlauches
- Diskretisierung der Vorländer
- Bestimmung der Rauhigkeitszonen

Die aufgenommenen Querprofile weisen zum Teil Profilabstände von bis zu 500 m auf. Da für die Modellierungen eine höhere Profildichte notwendig war, mussten die existierenden Querprofilinformationen verdichtet werden. Zuerst wurden die Querprofildaten so sortiert, dass die aufgenommenen Punkte vom linken zum rechten Ufer liegen. Zusätzlich wurden die Punkte auf die Linie vom linken zum rechten Punkt projektiert, damit sie immer in einer Linie liegen. Dieser Prozess wurde mittels eines eigenentwickelten Programms durchgeführt. Die Verdichtung der Querprofile wurde mithilfe des Programms HEC-RAS (*HEC-RAS,* 2010) realisiert. Anschliessend wurde der Flussschlauch mit einem Netz hauptsächlich aus Viereckelementen auf der Basis der erzeugten Querprofilpunkte aufgebaut.

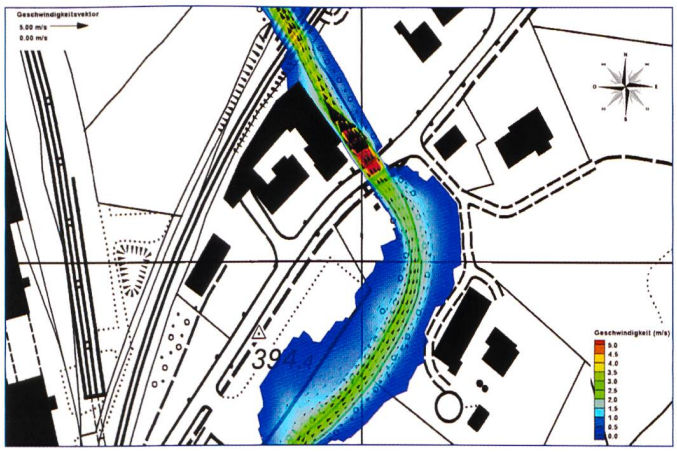

Bild 8. Berechnete Geschwindigkeiten für ein HQ_{50} an der Station Wyna-Suhr.

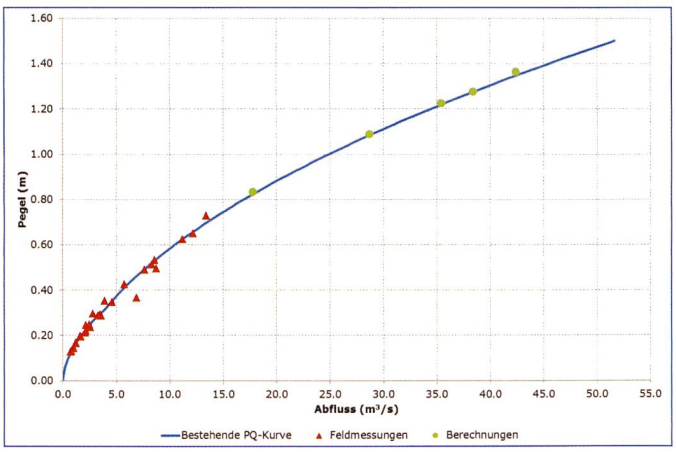

Bild 9. Messstation Unterentfelden, Eichmessungen, bestehende PQ-Beziehung und Berechnungen.

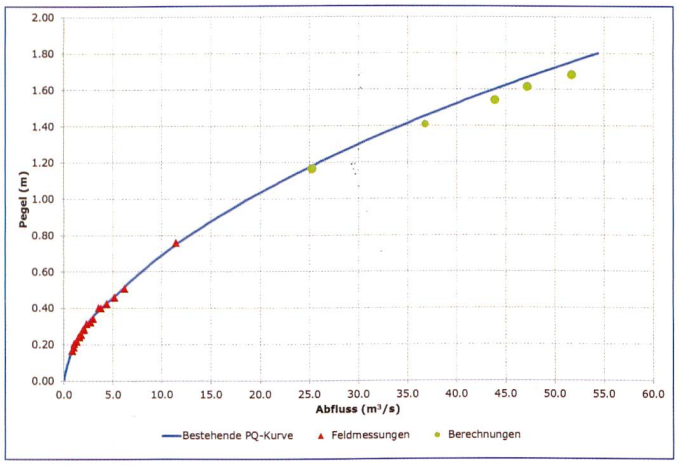

Bild 10. Messstation Suhr, Eichmessungen, bestehende PQ-Beziehung und Berechnungen.

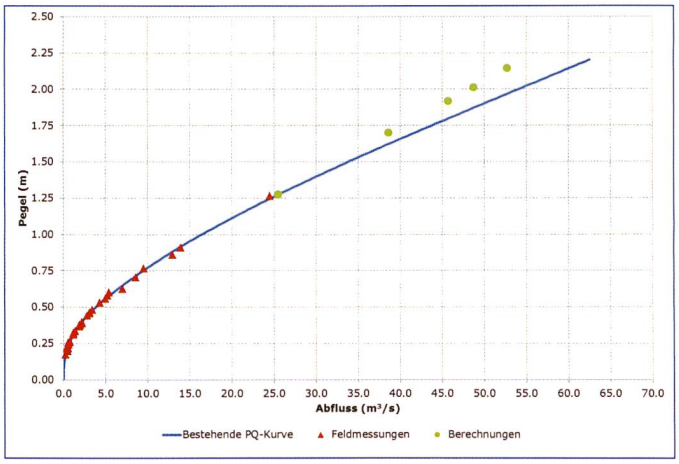

Bild 11. Messstation Wyna, Eichmessungen, bestehende PQ-Beziehung und Berechnungen.

	Unterentfelden			Suhr			Wyna-Suhr		
Ereignis	Q (m^3/s)	P (m)	*Abweichung der PQ (%)*	Q (m^3/s)	P (m)	*Abweichung der PQ (%)*	Q (m^3/s)	P (m)	*Abweichung der PQ (%)*
HQ_2	17.8	0.835	*-1.3*	25.3	1.166	*1.3*	25.5	1.276	*-0.2*
HQ_{10}	28.7	1.090	*-0.6*	36.8	1.409	*3.2*	38.6	1.701	*-4.7*
HQ_{30}	35.4	1.226	*-0.6*	43.9	1.542	*3.9*	45.7	1.919	*-6.4*
HQ_{50}	38.4	1.277	*-0.2*	47.2	1.615	*3.2*	48.7	2.014	*-7.1*
HQ_{100}	42.4	1.364	*-1.3*	51.7	1.681	*4.2*	52.7	2.146	*-8.4*

Tabelle 2. Die berechneten Pegel an den Messstationen.

Unabhängig vom erstellten Netz für den Flussschlauch wurde das Berechnungsnetz für das Vorland erstellt. Hierbei konnten mithilfe des Programms SMS die gewünschten Geländebruchkanten im Vorland, die Netzdichte und die Art der Elemente (dreieckig oder viereckig) festgelegt werden. Höheninformationen des digitalen Terrainmodells wurden nachträglich auf das Netz interpoliert.

Das Zusammenfügen des Vorlandnetzes und des Flussschlauchnetzes zum Gesamtnetz erfolgt automatisch im Programm SMS. Der Übergang Flussschlauch zum Vorland wurde anschliessend nochmals überprüft und manuell bearbeitet. Zusätzlich wurde die revitalisierte Strecke entsprechend dem Ausführungsplan manuell nachgebildet. *Bild 4* zeigt das für die Berechnungen verwendete Gesamtnetz.

Das Gesamtnetz wurde in verschiedene Rauhigkeitszonen eingeteilt. Diesem wurde im Rahmen der Modellkalibrierung entsprechende Rauhigkeitsbeiwerte zugeordnet.

4.2 Kalibrierung

Bei der Kalibrierung des Modells wurden erst die Rauhigkeitsbeiwerte nach Strickler (*Schröder,* 1990) für jede Zone ermittelt und innerhalb plausibler Grenzen angepasst. Dabei wurden die Beiwerte so kalibriert, dass die berechneten Pegelwerte mit den zum Vergleich vorliegenden Messungen möglichst gut übereinstimmten. Für die Kalibrierung wurden möglichst die hohen Abflüsse zwischen den Eichmessungen ausgewählt. Neben den Rauhigkeitsbeiwerten wurde die Geometrie der Gerinne im Zuge der Kalibrierung an einigen Stellen wie Brücken oder Schwellen genauer diskretisiert, um die zugewiesenen Strickler-Beiwerte innerhalb plausibler Grenzen zu halten. Wie die grafische Darstellung in *Bild 5* zeigt, liegen die Abweichungen für die Abflüsse über 10 m^3/s unter 4 % (blaue Zone).

4.3 Simulation und Resultate

Das kalibrierte Modell wurde für die Simulation der Abflüsse HQ_2 bis HQ_{100} eingesetzt. Alle Simulationen wurden stationär durchgeführt, d. h., der Zufluss wurde während der gesamten Simulationszeit konstant gehalten und die Simulation wurde so lange durchgeführt, bis die hydraulischen Parameter sich nicht mehr änderten. Bei den Simulationen wurden keine Verklau-

sungen oder Änderungen der Topographie durch Geschiebe berücksichtigt. Dies entspricht im Falle von Suhre und Wyna der Realität, da der Geschiebetrieb in diesen Gewässern gering ist.

Bei der Messstation Wyna wird die Strömung durch die Geometrie der etwas unterhalb der Messstation gelegenen Bogenbrücke beeinträchtigt. Die Fliessfläche wird dadurch mehr und mehr reduziert, je stärker der Pegel ansteigt *(Bild 6)*. Dies führt zu einem Rückstaueffekt und entsprechend zu höheren Pegelständen. Um diesen Effekt bei einem 2D-Modell berücksichtigen zu können, wurde die Fliessflächenreduktion in einer ersten Etappe bestimmt und beim zweiten Berechnungslauf diese Reduktion in Form einer seitlichen Verengung berücksichtigt.

Bild 7 zeigt die berechneten Fliesstiefen für ein HQ_{50} an den Stationen Suhre-Suhr und Wyna-Suhr. Die berechneten Geschwindigkeiten an der Station Wyna-Suhr sind in *Bild 8* für ein HQ_{50} dargestellt.

Tabelle 2 zeigt die Zusammenfassung der berechneten Pegel für alle Messstationen.

Bilder 9 bis *11* zeigen die berechneten Pegel zusammen mit den Eichmessungen und den bestehenden PQ-Beziehungen. Wie aus den Darstellungen ersichtlich wird, stimmt die bestehende PQ-Beziehung der Station Unterentfelden mit den Berechnungen sehr gut überein. Die PQ-Beziehung der Station Suhr überschätzt leicht die Pegel für die Hochwasserabflüsse. Im Falle Wyna werden die Pegel eher unterschätzt.

5. Schlussfolgerung

Die Verifikation der PQ-Beziehungen der Messstationen Unterentfelden und Suhr an Suhre und Wyna in Suhr wurde mittels eines hochaufgelösten hydraulischen 2D-Modells untersucht. Die Modellierungen haben sich als eine anwendbare und geeignete Ergänzung zu Eichmessungen bewährt. Der Nutzen besteht darin, dass sie:

- die Plausibilisierung der bestehenden PQ- Beziehungen erlauben;
- die inhärenten Unsicherheiten der PQ-Beziehungen im oberen Abflussbereich reduzieren;
- eine belastbare Grundlage für mögliche Anpassungen der PQ-Beziehung sind;
- weitere Optimierungen im Bereich der hydrometrischen Messstation aufzeigen.

Die Modellberechnungen in dieser vorgestellten Pilotstudie konnten die Genauigkeit der bestehenden PQ- Beziehungen für die solche hohe Abflüsse überprüfen und darstellen, obschon sie lediglich auf der Basis von Eichmessungen bei Nieder- und Mittelwasser extrapoliert wurden.

Die Modellierungen zeigten auch die Grenzen der Anwendbarkeit der durchgeführten 2D-Berechnungen bei komplexen Gerinnegeometrien, wie z. B. einer Bogenbrücke unterhalb der Messstation Wyna-Suhr.

Die Abflussverhältnisse an der Messstation Wyna-Suhr könnten aufgrund der komplexen geometrischen Gegebenheiten als zusätzliche Verbesserung des Gesamtmodells mit einem lokalen 3D-Modell untersucht werden. Die 2D-Resultate können dabei als obere und untere Randbedingung eines solchen 3D-Modells dienen.

Literatur

BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. Version 2.6 @ ETH Zurich, VAW, Vetsch D., Siviglia A., Ehrbar D., Facchini M., Geber M., Kammerer S., Peter S., Vanzo D., Vonwiller L., Volz C., Farshi D., Mueller R., Rousselot P., Veprek R., Faeh R., 2006–2016.

HEC-RAS, River Analysis System, Version 4.1, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center January 2010.

LeVeque, Randall J. «Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems», Cambridge University Press 2002.

Lienert, C., Kunz, H., Lüthi B. «Abflussmessung mit Webkamera», Umwelt Aargau Nr. 72/September 2016.

Schröder, RCM. «Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten», DVWK Schriften 92/1990.

SMS, Surface-Water Modeling System, Version 11.2.15, Aquaveo LLC, http://www.aquaveo.com.

Tan, W. «Shallow Water Hydrodynamics: Mathematical Theory and Numerical Solution for a Two-dimensional System of Shallow Water Equation», Elsvier Amsterdam 1992.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Davood Farshi,* EnHydro GmbH, Bergellerstrasse 39, CH-8049 Zürich, davood.farshi@enhydro.ch

Dr. *Christophe Lienert,* Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Landschaft und Gewässer, Entfelderstrasse 22, CH-5001 Aarau, christophe.lienert@ag.ch