

Quadroptergestütztes Oberflächen-PIV an der Töss

Martin Detert und Volker Weitbrecht

Kurzfassung

Dieser Beitrag zeigt beispielhaft das hohe Anwendungspotential der luftgestützten Particle Image Velocimetry. Dokumentiert wird die Strömungssituation des voralpinen Mittellandflusses Töss auf low-cost Basis mittels handelsüblichem Quadroptter und Actioncam. Diese Technik ermöglicht einen ausgezeichneten qualitativen Überblick auf ein zusammenhängendes Gesamtvektorfeld der Oberfläche eines längeren Flussabschnitts, was mit herkömmlichen punktuellen Mess-Verfahren kaum erreichbar ist. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsangaben für die hier dargestellte Anwendung kann etwa auf ± 0.1 m/s geschätzt werden. In Bereichen mit homogenem Seeding und geringen Störungen durch Vegetation oder Reflexionen von Sonnenlicht ist die Streuung deutlich kleiner. Die Entzerrung der Einzelbilder bzw. deren Rektifizierung erfolgt mit Hilfe der Structure-from-Motion Technik. Die dazu notwendigen Bodenreferenzpunkte sind mit einer mittleren Genauigkeit von ± 0.33 m bzw. ± 1.4 m in zwei zugehörigen digitalen Oberflächenmodellen wiedergegeben. Hinsichtlich einer genaueren Quantifizierung dieser Angaben besteht Forschungsbedarf.

1 Ausgangslage

Der Kanton Zürich (Schweiz) plant, auf einem rund 1 km langen Abschnitt des Flusses Töss bei Winterthur (47.478° N, 8.708° O) bauliche Maßnahmen durchzuführen. Sohle und Ufer sollen im Rahmen des ordentlichen Gewässerunterhalts weitreichender strukturiert werden, auch um die Längsvernetzung zu verbessern. Die Messmethodik der luftgestützten Particle Image Velocimetry (PIV), welche zurzeit an der VAW entwickelt wird (Detert et al. 2015, Detert und Weitbrecht 2015) und auf langjähriger Forschung aus Japan aufbaut (z.B. Fujita und Kunita 2011), soll zum Zweck der Dokumentation der Strömung vor und nach der Baumaßnahme eingesetzt werden. Das Verfahren der luftgestützten PIV benötigt die Zugabe von sogenanntem Seeding zur Sichtbarmachung der Strömung. Ziel der Messungen ist es, die Oberflächen-Geschwindigkeit in weiten Bereichen dieses Abschnittes zu erfassen. Letztendlich ist zu einem späteren Zeitpunkt ein Vergleich mit Messergebnissen nach dem Umbau angedacht, um eine mögliche Veränderung vor allem hinsichtlich einer geänderten, ökologisch verbesserten, Gerinnestrukturierung zu beurteilen.

Aufgrund des ufernahen Bewuchses und des damit begrenzten optischen Zugangs sollte eine erste Befliegung im Jahr 2015 zeitnah vor Erreichen der vollen Vegetationszeit sowie der geplanten Umbaumaßnahme erfolgen. Auf eine havariieriskante Befliegung im Bereich von Hochspannungsleitungen wurde verzichtet. Mit dem vorgesehenen Quadroptter konnte a priori die Abdeckung einer Fließstrecke von 500 m pro Tag zugesichert werden. Begrenzender Faktor ist bei diesem Fluggerät insbesondere die Batteriekapazität. Aufgrund der zum Frühjahr 2015 vor Baumaßnahme noch relativ monotonen Gerinnestruktur der Töss wurde die erreichbare maximale Messstrecke jedoch als hinreichend für die Dokumentation des Ausgangszustands betrachtet.

2 Vorgehensweise

Das Vorgehen zur Bestimmung von Strömungsfeldern der Oberflächengeschwindigkeit lässt sich in zwei Abschnitte einteilen:

1. Messkampagne

- Messvorbereitungen, inkl. Auslegen und Einmessen der Bodenreferenzpunkte
- Zugabe des Seedings und simultane Quadropter-gestützte Videoaufnahme

2. Auswertung

- Orthorektifizierung und Georeferenzierung der einzelnen Videobilder
- Bildbearbeitung zur Betonung der sich bewegenden Seedingpartikel
- Geschwindigkeitsauswertung mittels PIV-Technik

Die grundsätzliche Prozedur zu Messkampagne und Auswertung ist in Detert et al. (2015) beschrieben. Darüber hinausgehende Informationen zum gewählten Vorgehen bei Messung und Auswertung für die Situation an der Töss werden nachstehend gegeben. Auf vergleichbaren Ergebnissen aufbauende Abschätzungen des Abflusses wie in Detert und Weitbrecht (2016) sind jedoch nicht Gegenstand der hier dargestellten Untersuchung.

3 Messkampagne

3.1 Vorbereitungen und Randbedingungen

Eine Übersicht über den Untersuchungsbereich wird in Abb. 1 gegeben. Befliegungen und zugehörige Arbeiten wurden am 13. April 2015 durchgeführt. Der Abfluss im Projektperimeter unterstrom der Kemptmündung lässt sich über benachbarte Pegel abschätzen. Tab. 1 gibt detaillierte Informationen hierzu. Der Abfluss im Messbereich betrug demnach etwa $3\text{--}4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Die Einmessung von Bodenreferenzpunkten erfolgte mit einem Tachymeter *Leica System 1200*. Referenzpunkte am linken sowie am rechten Ufer im Bereich der Kemptmündung (Feld ‚A‘) wurden mit einer Genauigkeit von $\pm 0.05 \text{ m}$ eingemessen. Für die Punkte am rechten Ufer weiter unterstrom der Kemptmündung (Felder ‚B‘ und ‚C‘) stellte der hohe Baumbewuchs in Verbindung mit einem steil ansteigenden Gelände im Nahbereich eine größere Herausforderung dar, so dass die Abdeckung mit Satellitensignalen weniger optimal war. Hier konnte lediglich eine Genauigkeit von $\pm 0.8\text{--}1.2 \text{ m}$ erreicht werden, was für die spätere Analyse jedoch als hinreichend genau angesehen wurde.

Bereits zu Beginn der ersten Messung havarierte ein Quadropter (*DJI Phantom FC40*) mit einem Baum. Die Messung wurde mit einem Ersatz-Quadropter (*DJI Phantom II*, inkl. Gimbal, Anschaffungspreis etwa 500 €) erneut durchgeführt, jedoch hatte die nun verwendete Kamera (*GoPro3 black Edition*, Anschaffungspreis etwa 500 €) kein Weitwinkelobjektiv. Als Folge war das aufgenommene, verwertbare Bildfeld etwa 25% schmaler als ursprünglich geplant, was einen leicht erhöhten Auswertungsaufwand nach sich zog. Prinzipiell aber ist die unter den an der Töss gegebenen Randbedingungen erreichte Bildqualität der Aufnahmen vergleichbar mit denen einer ursprünglich vorgesehenen Weitwinkel Aufnahme. Videoaufnahmen wurden im Modus 17:9 (Bildbreite : Bildhöhe) mit einer Auflösung von $4096 \times 2160 \text{ px}^2$ bei 11.988 Bildern/s durchgeführt.

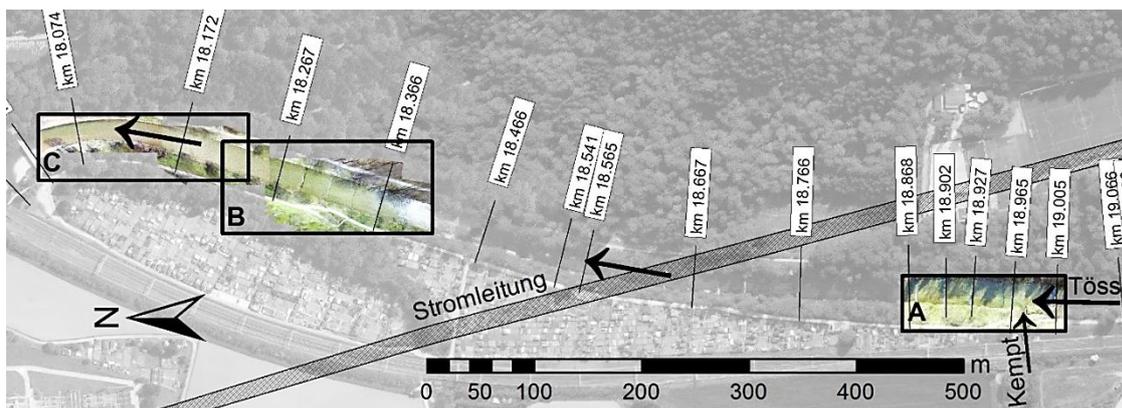


Abb. 1 Übersicht über den Projektperimeter mit Feld ‚A‘: Bereich Kemptmündung, und Felder ‚B‘ und ‚C‘: Bereich oberstrom Wehr/ Eisenbahnbrücke; Lage von (Schwellen-) Profilen und Kilometrierung aus Vermessungen 2004–2014

Tab. 1 Kantonale Pegelmessungen des Abflusses Q zum Zeitpunkt der Befliegung am 13. April 2015, 11:00–15:00; Pegel-ID und Abflusswerte aus Hydrometrie (2015)

Ort	Pegel-ID	Abfluss Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Töss-km 31.8 (Rämismühle)	ZH 520	1.85
Kempt-km 0.2 (Winterthur)	ZH 581	1.00
Töss-km 14.8 (Wülflingen)	ZH 518	4.45

Der Bereich um die Hochspannungsleitung bei km 18.6 (vgl. Abb. 1) wurde großräumig ausgespart, so dass letztlich ein kleineres Feld im Bereich km 18.9 (‚A‘, 50 m oberstrom bis 100 m unterstrom der Kemptmündung) und zwei größere Felder oberstrom km 18.0 (‚B‘ und ‚C‘, 400 m oberstrom bis 50 m oberstrom Wehr/ Eisenbahnbrücke) für eine anschließende Analyse der Oberflächengeschwindigkeiten videometrisch aufgenommen wurden (siehe auch Abb. 1).

3.2 Seeding

Als Seeding wurden wie in vergleichbaren vorangegangenen Versuchen unbehandelte Fichtenholzplättchen mit Kantenlänge $60 \times 60 \text{ mm}^2$ und einer Stärke von 2–3 mm verwendet. Diese wurden wenige Minuten vor der Zugabe in Eimern gewässert, damit Ihre Wichte sich dem von Wasser angleicht und sie der Strömung verlässlich folgen. Als Nebeneffekt verbessert sich durch ein höheres Gewicht auch ihre mögliche Wurfweite, so dass das Gewässer gut vom Ufer aus mit Seeding versehen werden konnte. Über zwei Messreihen mit effektiv auswertbaren 3 min Dauer und einer Messreihe mit effektiv auswertbaren 5 min Dauer wurde der Inhalt von insgesamt acht mit Holzschindeln gefüllten Kartons ($0.35 \times 0.35 \times 0.55 \text{ m}^3$) zugegeben.

Die am Quadroptor montierte Kamera wurde so ausgerichtet, dass deren Bildzeilen und der Verlauf der Töss etwa parallel lagen, um jeweils möglichst einen langen Fließabschnitt von etwa 100–150 m im Kamerabildfeld von 17:9 zu haben. Der Quadroptor wurde dem Schwerpunkt des Seeding-Streifens folgend geflogen. Die Flughöhen über Grund betragen für das Feld ‚A‘ 80 m und für das Feld ‚B‘ und ‚C‘ 40–60 m.

4 Auswertung

4.1 Orthorektifizierung und Georeferenzierung

Der erste Schritt der Analyse betrifft die Orthorektifizierung und Georeferenzierung der Video-Einzelbilder. Abweichend vom bisherigen Vorgehen nach Detert et al. (2015) wurde dieser Schritt nicht über eine projektive Transformation mit MATLAB, sondern über eine in der Software *PhotoScan* (Agisoft 2015) implementierte Methodik durchgeführt. *PhotoScan* verwendet mit der Technik des Structure-from-Motion (SfM) ein optimierteres Punkte-Matching Verfahren. Darüber hinaus wird die Kameraverzerrung, bedingt durch die Fischaugenlinse, implizit korrigiert. Zudem ist die Erkennung bzw. das Handling der Bodenreferenzpunkte benutzerfreundlicher gestaltet. Das Ergebnis ist im ersten Schritt eine 3D-Punktewolke, die auch in eine Netzstruktur mit Fototextur umgerechnet werden kann. Abb. 2 zeigt je eine solche letztere Darstellung der beiden Untersuchungsteilgebiete, bei der auch die Bodenreferenzpunkte markiert sind. Die Lage des Wasserspiegels wurde von Hand nachträglich geglättet.

Ein Maß für die Genauigkeit der Modelle aus *PhotoScan* gibt der Mittelwert der Fehlerquadrate der projizierten 3D-Position der Bodenreferenzpunkte. Eine Auflistung zu den Kalibrierungsfehlern kann Tab. 2 entnommen werden. Für das Modell im Bereich der Kemptmündung konnte ein mittlerer Positionsfehler von ± 0.33 m (entsprechend ~ 1 px auf den Rohbildern) bei neun Referenzpunkten erreicht werden. Für das 3D-Modell im Bereich oberstrom des Wehres/ der Eisenbahnbrücke liegt der mittlere Lagefehler bei etwas höheren ± 1.4 m (entsprechend ~ 3 – 4 px auf den Rohbildern) für 18 Referenzpunkte.

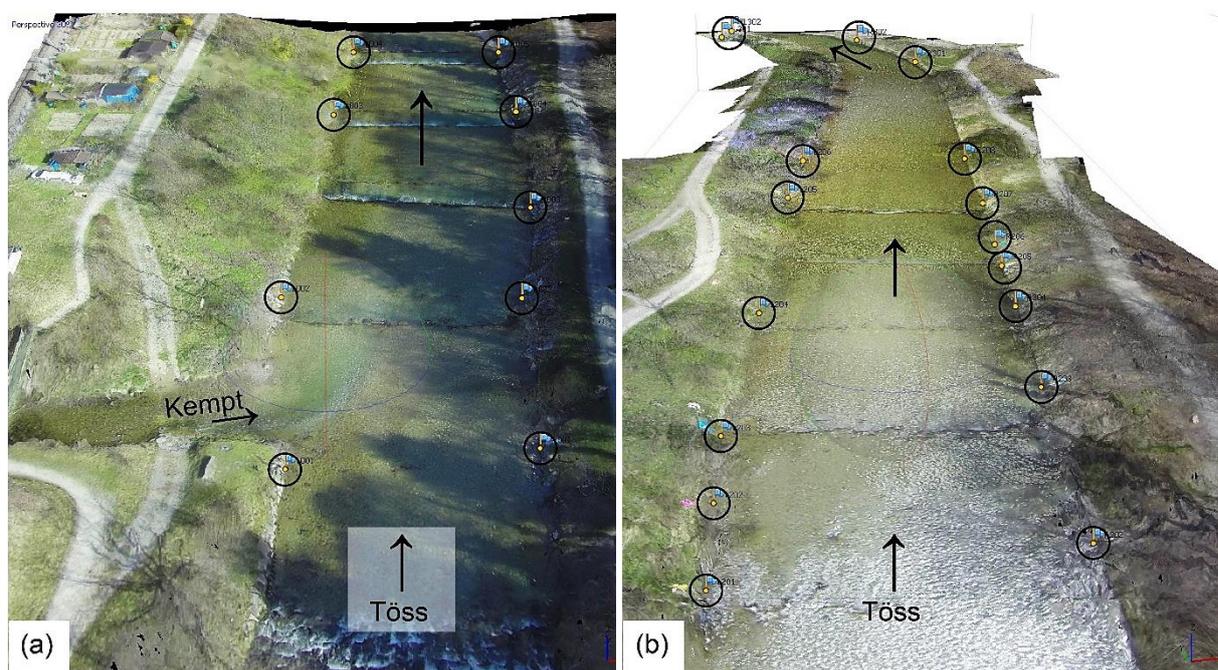


Abb. 2 Perspektivische Ansicht der 3D-Modelle mit Textur aus PhotoScan (Agisoft) inkl. markierter Bodenreferenzpunkte sowie Fließpfeile: (a) Kemptmündung (Feld ‚A‘), (b) Bereich oberstrom Wehr/ Eisenbahnbrücke (Felder ‚B‘ und ‚C‘)

Tab. 2 3D-Positionsfehler der Referenzpunkte in mit *PhotoScan* errechneten 3D-Modellen

Teilbereich	Anzahl Referenzpunkte (-)	mittlerer Lagefehler (m)	mittlerer Lagefehler (px, Rohbild)
„A“ = Mündung Kempt	9	0.33	~1
„B“+„C“ = oberstrom Wehr/ Eisenbahnbrücke	18	~1.4	~3–4

Die einzelnen Videobilder wurden im nächsten Schritt auf das jeweilig optimierte 3D-Modell per Punktematching-Verfahren rektifiziert. Hierbei konnten die Einzelbilder mit einem mittleren Fehler von <0.5 px für den Bereich der Kemptmündung und von ~ 1 px für den Bereich oberstrom Wehr/ Eisenbahnbrücke auf das 3D-Modell projiziert werden. Für die weitere Bildbearbeitung wurden die Einzelbilder im Anschluss über ein *Python*-Skript als georeferenziertes Orthofoto exportiert. Im Hinblick auf das PIV-Verfahren wurde für die exportierten Bilder eine Auflösung von 3.125 mm px^{-1} ($= 2^{-5} \text{ m px}^{-1}$) gewählt.

4.2 Bildbearbeitung

Grundsätzlich sind die Luftaufnahmen von guter Qualität und haben im Vergleich zu typischen Orthofotos räumlich aber auch zeitlich eine sehr hohe Auflösung. Gleichwohl lässt sich die spätere Qualität der Geschwindigkeitsfelder noch deutlich durch Kombination und Anwendung mehrerer Filter auf die Orthofotos verbessern. Im Rahmen des Preprocessing wurden Filter angewendet, um die Seedingpartikel im Bild optisch hervorzuheben. Zunächst wurde für jedes Orthofoto ein mittleres Hintergrundbild als Median aus dem Zeitraum ± 11 Bildern um das jeweilige Orthofoto, d.h. im Bereich ± 1 s um die Bildaufnahme, berechnet. Die Pixelwerte dieses Hintergrundbildes wurden vom eigentlichen Orthofoto abgezogen. Das Ergebnis gibt eine Aufnahme, bei der Pixel mit Bewegungsinformation betont werden. Dieses Bild enthält aber auch ein unerwünschtes Hintergrundrauschen. Letzteres wurde mit einem Wiener-Denoisingfilter auf $3 \times 3 \text{ px}^2$ und einem Hochpassfilter (gewähltes Limit: Median+ 2σ) minimiert. Abb. 3 gibt ein Beispiel.

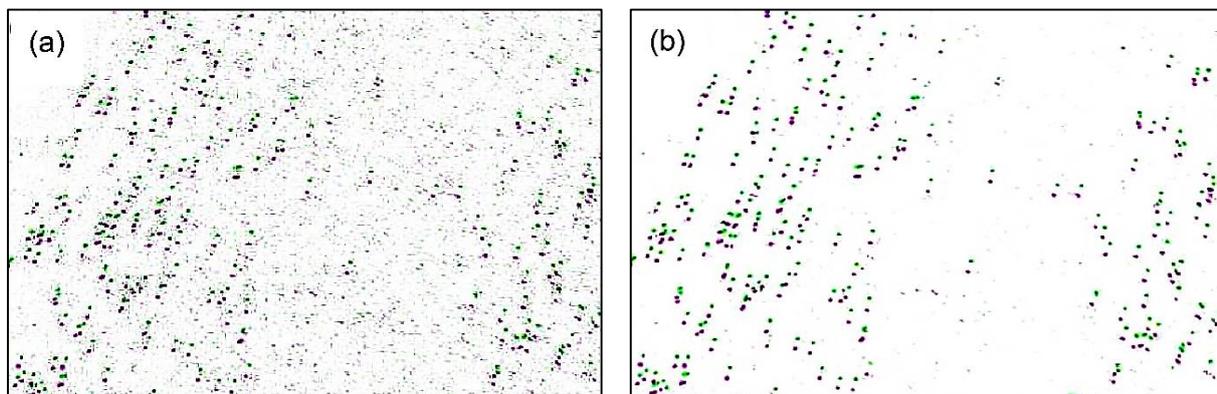


Abb. 3 Filterung des Hintergrundrauschens mittels Denoising und Hochpassfilter, $15 \times 10 \text{ m}^2$, Überlagerung zweier Negativ-Bilder mit Abstand 0.25 s und deutlich erkennbare Richtung der Bewegung hin zum oberen Bildrand (rot→grün): (a) Rohbild, (b) Bild nach Filterung

4.3 Ermittlung der Oberflächengeschwindigkeiten

Die Fließgeschwindigkeiten wurden unter Verwendung der georeferenzierten und gefilterten Bilder anhand eines PIV-Algorithmus bestimmt. Mit der Anwendung eines Kreuzkorrelations-Verfahrens zwischen zwei Bildpaaren mit bekanntem Zeitschritt werden dabei die Verschiebung von mehreren Partikeln bzw. Intensitätsmustern analysiert und die Geschwindigkeitsvektoren auf einem Raster dargestellt. Damit ist das gesamte Geschwindigkeitsfeld der Oberfläche in Zeit und Raum diskretisiert, was im Vergleich zu Ergebnissen aus typischen Punktmessungen wie z.B. mit Acoustic Doppler Current Profilern (ADCP) ein deutliches Mehr an Information bei klar kürzerer Messdauer bzw. Messaufwand und entsprechend geringeren Kosten darstellt. Auch bei flachen Wassertiefen kann die PIV-Technik im Gegensatz zu Messungen mit ADCP eingesetzt werden.

Im vorliegenden Fall wurde die MATLAB-basierte Open-Source-Software *PIVlab* von Thielicke und Stamhuis (2015) genutzt, um die Geschwindigkeiten zu bestimmen. Die Bildanalyse wurde an Bildsequenzpaaren von [(1:3), (3:6), (6:9), ...] durchgeführt, um einen hinreichenden Zeitversatz zu erreichen. So werden Fehler aufgrund von unzureichend kleinen Partikel-Verschiebungen minimiert. Der PIV-Algorithmus wurde auf einem finalen Gitter von $32 \times 32 \text{ px}^2$ mit 50% Überlappung angewendet. Mit einer Rasterskala von 32 px m^{-1} für die georeferenzierten Einzelbilder führt dies zu einer Rasterauflösung von $1 \times 1 \text{ m}^2$ bzw. einem Vektorabstand von 0.5 m bei einer zeitlichen Auflösung von 4 Hz. Die über das Kreuzkorrelationsverfahren ermittelten Strömungsvektoren wurden im Rahmen des Postprocessings ebenfalls gefiltert. Sowohl unrealistisch große Strömungsvektoren als auch Fehlvektoren im Uferbereich wurden eliminiert. Zur Anwendung kamen in der Software *PIVlab* globale Geschwindigkeitslimite in Nord-Süd bzw. Ost-West Richtung, sowie zur Glättung des momentanen Vektorfelds ein Filter zur Standard-Abweichung ($<7\sigma$) und ein lokaler Medianfilter ($<3\sigma$). Zusätzlich zu den Filtern in *PIVlab* wurde noch ein Medianfilter auf jede Zeitreihe eines Rasterfeldes angewendet, so dass für das finale, zeitlich-gemittelte Geschwindigkeitsfeld nur Vektoren im Bereich $\pm 1\sigma$ um den lokalen Median betrachtet wurden.

Aufbauend auf Positionsfehlern der Bodenreferenzpunkte in den 3D Modellen und den Betrachtungen nach Detert und Weitbrecht (2015) kann die erreichte Genauigkeit der Geschwindigkeitsangaben etwa auf $\pm 0.1 \text{ m s}^{-1}$ geschätzt werden. Bei homogenem Seeding und geringen Störungen durch Reflektionen von Sonnenlicht oder Vegetation ist die Genauigkeit jedoch deutlich besser.

5 Strömungsfelder der Oberflächengeschwindigkeit

Exemplarische Ergebnisse werden in Abb. 4 dargestellt. Die Daten liegen georeferenziert vor, können also für eine weitergehende Analyse wie beispielsweise einem Vergleich mit zukünftigen Messergebnissen gut verwendet werden.

Im Bereich der Kemptmündung (Feld ‚A‘) liegen die Oberflächengeschwindigkeiten bei $0.3\text{--}0.9 \text{ m s}^{-1}$. Direkt unterstrom der Schwellen variieren die Geschwindigkeiten lokal teilweise beträchtlich.

Diese Variabilität setzt sich auch im Bereich oberstrom Wehr/ Eisenbahnbrücke (Feld ‚B‘) fort bis dahin, wo Wehrschwellen eingebaut sind, d.h. bis etwa km 18.3. Hier variieren die Oberflächengeschwindigkeiten sogar etwas stärker in einem Bereich $0.4\text{--}1.2 \text{ m s}^{-1}$. Aufgrund einer ähnlichen Strömungsstruktur in Feld ‚A‘ und Feld ‚B‘ kann vermutet werden, dass auch im

dazwischen liegenden, nicht vermessenen Bereich unterhalb der Stromleitungsquerung die Strömungsbedingungen ähnlich variabel sind. Auch hier sind die Schwellen auf vergleichbare Art eingebaut. Nach der letzten Schwelle bei km 18.3 jedoch beschleunigt die Oberflächen-Geschwindigkeit auf $0.9\text{--}1.2\text{ m s}^{-1}$, welche von ihrem Grundmuster her relativ homogen über die Fließbreite verteilt ist. Im Feld ‚C‘ ab km 18.15 eingangs der Kurve verringert sich die Oberflächengeschwindigkeit dann gleichmäßig auf $0.3\text{--}0.6\text{ m s}^{-1}$ aufgrund des zunehmenden Einflusses der Staukurve am Wehr und legt sich tendenziell an den äußeren Kurvenrand an.

Die Geschwindigkeitsfelder zeigen auch Bereiche mit unrealistischen Geschwindigkeiten, welche auf zu geringen Seedinganteil (z.B. Teilbereich Kemptmündung, Streifen in Strömungsmitte ab unterstrom letzter Schwelle) oder zu starker Überblendung durch die Sonne (Teilbereich unterstrom km 18.4) zurückzuführen sind.

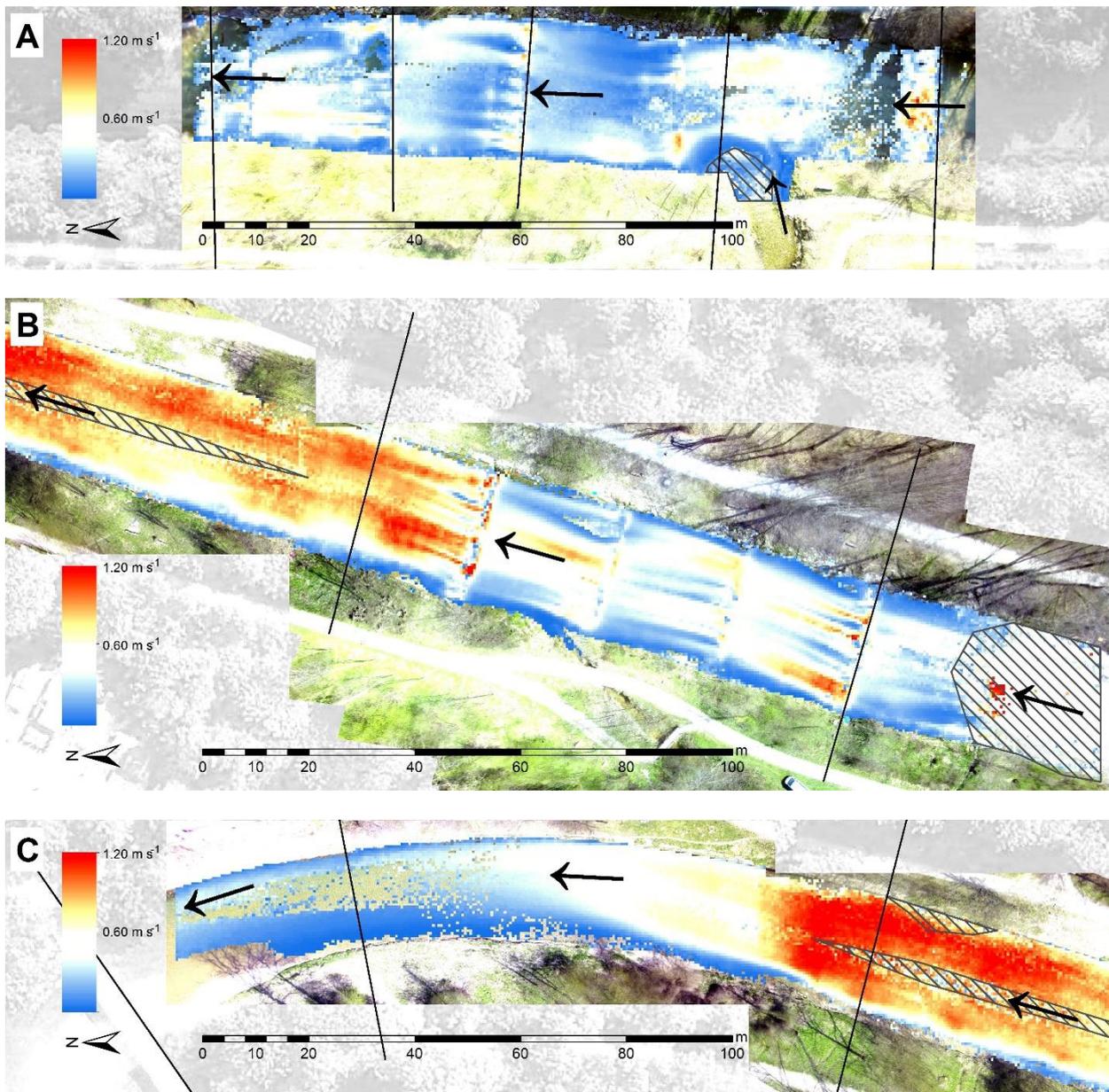


Abb. 4 Darstellung der mit luftgestützter PIV errechneten Oberflächengeschwindigkeiten (vgl. Abb.1); Linien = Lage von (Schwellen-)Profilen (Vermessung 2004–2014); Schraffur = Fehlbereiche durch mangelnde Seedingdichte und Oberflächenreflektion

Es sei hier darauf hingewiesen, dass Oberflächengeschwindigkeiten von Fließgewässern tendenziell leicht höhere Werte geben als eine tiefengemittelte Geschwindigkeit. Für die hydraulischen Randbedingungen der betrachteten Fließabschnitte werden die tiefengemittelten Geschwindigkeiten auf ca. 85–90% der Oberflächengeschwindigkeit geschätzt (Rantz 1982).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung von großflächigen Strömungsfeldern an der Töss gibt ein weiteres Beispiel für das hohe Potential einer luftgestützten PIV-Anwendung. Diese low-cost Messtechnik (ca. 1000 € für Quadrocopter und Kamera) ermöglicht einen ausgezeichneten qualitativen Überblick auf ein zeitlich gemitteltes Oberflächengeschwindigkeitsfeld eines Fließgewässers. Im hier vorgestellten Anwendungsfall werden Strömungsstrukturen für Bereiche mit Schwellen, für eine Beschleunigungsstrecke und eine Kurvensituation vor einem Wehr dokumentiert. Diese Abschnitte wären sämtlich mit herkömmlichen punktuellen Messungen wie z.B. ADCP nur schwer fassbar. Auch hydronumerische Modellierungen stoßen hier an ihre Grenzen, da die Sohlgeometrie in solchen Fällen meist nur eine grobe Näherung der realen Detailstruktur wiedergibt. Trotzdem: Ist eine allumfassende Vermessung des Strömungsfeldes gewünscht, braucht es nach wie vor Aufnahmen mittels ADCP oder vergleichbarer Technik, da hier auch tiefendifferenzierte 3D-Informationen inkl. Sohlgeometrie ermittelt werden.

Die Bildrektifizierung erfolgt mit Hilfe der Structure-from-Motion Technik, wobei Boden-Referenzpunkte mit einer mittleren Genauigkeit von ± 0.33 m bzw. ± 1.4 m in zwei zugehörigen digitalen Oberflächenmodellen wiedergegeben werden. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsangaben für die hier dargestellte Anwendung kann grob etwa auf ± 0.1 m/s geschätzt werden, ist bei gutem gleichmäßigem Seeding und geringen Störungen durch Reflektionen von Sonnenlicht oder Vegetation jedoch deutlich besser. Hinsichtlich einer genaueren Quantifizierung dieser Angaben besteht noch eindeutig Forschungsbedarf.

Weitere Entwicklungsschritte sind nun, dieses Verfahren weiter zur Anwendungsreife zu bringen. Wesentliche Punkte sind dabei die Beurteilung der Messgenauigkeit, eine Optimierung der gleichmäßigen Zugabe von Seeding und eine Dokumentation von best-practice Hinweisen in Form eines Leitfadens. Ein luftgestütztes PIV sollte zukünftig einsetzbar sein für Zwecke des flussbaulichen Monitorings, zur Durchflussschätzung oder für hydraulische Fragestellungen bei großräumigen Strömungsstrukturen, z.B. im Fall von Revitalisierungen. Dem Endnutzer soll damit in naher Zukunft ein möglichst universelles Bearbeitungswerkzeug für Luftbilder zur Anwendung im Fluss- und Wasserbau zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Diese Arbeit und Teile der zugehörigen Forschung wurden finanziert und ermöglicht durch das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich (Schweiz).

Literatur

- Agisoft (2015). Agisoft PhotoScan Professional Edition (version 1.1.6), www.agisoft.com.
- Fujita, I.; Kunita, Y. (2011). Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera, *Journal of Hydro-environment Research* 5(4), 323-331.
- Detert, M.; Trachsel, J.; Weitbrecht, V. (2015). Quadrokooperbasierte Messung von Oberflächengeschwindigkeiten, *Wasser Energie Luft*, 107(3), 211-217.
- Detert, M.; Weitbrecht, V., (2015). A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept, *Journal of Hydraulic Research*, 53(4), 532-539.
- Detert, M.; Weitbrecht, V. (2016). Estimation of flow discharge by an airborne velocimetry system, Proc. 1st Int. SHF-Conf. on Drones and Hydraulics, Paris-Cachan, France, April 2015, *La Houille Blanche*, 1, 13-17.
- Hydrometrie (2015). www.hydrometrie.zh.ch.
- Rantz, S.E. (1982). Measurement and computation of stream-flow: Vol. 1 Measurement of stage and discharge, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 2175.
- Thielicke, W.; Stamhuis, E.J. (2015). PIVlab: Time-resolved digital Particle Image Velocimetry tool for MATLAB (version: 1.35). <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>.

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Martin Detert
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
detert@vaw.baug.ethz.ch

Dr.-Ing. Volker Weitbrecht
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch