

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 112 (2020)
Heft: 3

Artikel: Quadrooptervideo-basierte Vermessung von Fliessgewässern
Autor: Detert, Martin / Prokoph, Andreas / Derungs, Guido
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941698>

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: 13.02.2026

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

Quadrokoptervideo-basierte Vermessung von Fliessgewässern

Martin Detert, Andreas Prokoph, Guido Derungs, Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt die Anwendung berührungsfreier Methoden, um Sohltopografien bis Wassertiefen von 1,5m, Oberflächenfliessgeschwindigkeiten sowie Korngrössen eines typischen Schweizer Fliessgewässers räumlich hochauflösend zu vermessen. Wesentliches Werkzeug ist eine handelsübliche Kamera-Quadrokopter-Kombination. Testmessungen wurden an einem 500m langen Abschnitt der Wiese in der Stadt Basel durchgeführt. Fotogrammetrisch berechnete 3-D-Punktwolken der Bathymetrie, welche mit einem vereinfachen Ansatz refraktionskorrigiert wurden, haben eine Punktedichte, vergleichbar einer Lidar-Vermessung. Nach einer Korrekturerweiterung liegen die Unterwasserpunkte im Genauigkeitsbereich von $\pm 0,05$ m zu 78 terrestrisch aufgenommenen Referenzpunkten. Zur Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten wird jedes Videoeinzelbild automatisiert orthorektifiziert und georeferenziert. Die so stabilisierten Videoaufnahmen werden mithilfe eines Particle-Image-Velocimetry-Verfahrens, welches einzelne zeitlich aufeinanderfolgende Bildbereiche miteinander korreliert, in Oberflächengeschwindigkeitsfelder mit einem Vektorraster von $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ umgerechnet. Ein nicht überströmter Bereich der Sohle wird exemplarisch mit der Software BASEGRAIN analysiert, um das Potenzial einer luftgestützten Korngrössenvermessung aufzuzeigen, bei der jedes detektierte Einzelkorn auch georeferenziert werden kann. Anwendungsbereiche für die hier vorgestellten berührungsfreien Methoden sind Gewässermonitorings im Rahmen von Revitalisierungen, Beurteilungen der Strömungsverhältnisse bei Wasserbauwerken anhand eines «Big Pictures», Analysen von Hochwasserereignissen, Schätzungen von Abflussraten sowie Grundlagenermittlungen für mehrdimensionale hydronumerische Modelle.

Résumé

Cet article décrit l'utilisation de méthodes sans contact pour mesurer des profondeurs d'eau jusqu'à 1,5m, les vitesses d'écoulement de surface et la taille des grains d'une rivière typique en Suisse. L'outil essentiel est un drone quadrirotor équipé d'une caméra grand public disponible dans le commerce. Des mesures ont été effectuées sur une section de 500m de prairie de la ville de Bâle. Les nuages de points 3D de bathymétrie calculés par photogrammétrie, qui ont été corrigés par réfraction avec une approche simplifiée, ont une densité de points comparable à une mesure lidar. Après une correction améliorée, la précision des points sous l'eau est de l'ordre de $\pm 0,05$ m à 78 points de référence enregistrés par voie terrestre au moyen d'un tachymètre. Pour déterminer les vitesses d'écoulement, chaque image vidéo est automatiquement ortho-rectifiée et géo-référencée. Les enregistrements vidéo stabilisés sont convertis en champs de vitesse de surface avec une grille vectorielle de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ en utilisant une méthode de vélocimétrie par image de particules qui corrèle les images successives les unes avec les autres. Une partie asséchée du lit de la rivière est analysée à l'aide du logiciel BASEGRAIN pour démontrer le potentiel de mesure du grain en suspension dans l'air, dans lequel chaque grain individuel détecté peut également être géo-référencé. Les domaines d'application des méthodes sans contact présentées ici sont la surveillance de l'eau dans le cadre de la revitalisation, l'évaluation des conditions d'écoulement dans les structures hydrauliques à l'échelle globale, l'analyse d'inondations, l'estimation des taux de rejet et la détermination des données pour les modèles hydronumériques multidimensionnels.

1. Einleitung

Die Verbreitung von sog. Unmanned Aerial Vehicles (UAV, auch Drohnen) hat in den letzten Jahren in vielen zivilen Bereichen Einzug gehalten. Durch die einfache Steuerbarkeit, die ruhige Fluglage und die stark gesunkenen Anschaffungskosten sind sie für jedermann erschwinglich und einfach zu bedienen.

Auch dem Flussbauingenieur eröffnen sich dadurch neue Möglichkeiten zur Fernerkundung, Datenakquisition und -analyse. So testeten Woodget *et al.* (2015) erfolgreich ein vereinfachtes Verfahren zur Refraktionskorrektur, um drohnenbildbasiert die Sohltopografie durch die Wasseroberfläche hindurch zu vermessen. Dietrich (2017) hat die Genauigkeit dieses Verfahrens noch erhöhen können. Weiter zeigen Detert und Weitbrecht (2015) und Detert *et al.* (2015, 2017) auf, wie mit einem handelsüblichen Quadrokopter, in Kombination mit einer Actioncam, grossflächig Oberflächengeschwindigkeitsfelder der Strömung eines typischen Schweizer Mittellandflusses vermessen werden können. Dabei wird eine für Feldmessungen hohe Genauigkeit und räumliche Auflösung erreicht. Auch die luftgestützte Erfassung von Korngrössen über bildbasierte Software wie BASEGRAIN (Detert und Weitbrecht, 2012, 2013) wurde bereits erfolgreich angewendet, z. B. durch Westoby *et al.* (2015). Neuste Ansätze zur luftbildbasierten Gravelometrie zielen dabei auf die Nutzung von künstlicher Intelligenz (Buscombe, 2020; Irniger *et al.*, 2020).

Ein Monitoring mittels berührungsloser luftgestützter Vermessung bietet gegenüber klassischen In-situ-Punktmessungen den Vorteil, kostensparend flächendeckende Daten aufzunehmen. Auch an Orten bzw. zu Zeitpunkten, bei denen aufgrund von Strömungsrandbedingungen keine Messung mit klassischen Techniken möglich ist, wie z. B. im Hochwasserfall oder in schwer zugänglichem Gelände, können bildbasierte drohnengestützte Techniken eingesetzt werden.

Eine wesentliche Herausforderung einer UAV-basierten Gewässervermessung ist die noch fehlende Akzeptanz bei Entscheidungsträgern, diese Methodik vermehrt einzusetzen. Zur Einordnung des Potenzials zur Durchführung von Erfolgskontrollen bei Fließgewässerrevitalisierungen hat die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) zusammen mit dem Tiefbauamt Basel-Stadt Testmessungen am Fluss Wiese durchgeführt. Nachstehend werden die dabei durchgeführten Arbeiten und die verwendeten Methoden beschrieben, die aufgenommenen Daten entsprechend analysiert sowie die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

2. Vermessungsarbeiten

Die Befliegungen des zu untersuchenden Abschnitts der Wiese und ein Teil der Vermessungsarbeiten wurden am Vormittag des 16. Mai 2019 durchgeführt. *Bild 1* zeigt eine Übersicht zum Projektperimeter.

Für eine luftgestützte Vermessung kamen zwei verschiedenen Systeme zum Einsatz. Zwischen 9 bis 10 Uhr wurden Befliegungen durch das Tiefbauamt Basel-Stadt mit eigener Drohne durchgeführt. Verwendet wurde ein Oktokopter AscTec Falcon 8 inklusive einer Gimbal-stabilisierten Kamera Sony Alpha 7R, um Standbilder mit $7360 \times 4912 \text{ px}^2$ aufzunehmen. Der Flugplan umfasste vier parallele Bahnen entlang des Flusslaufes mit einem Abstand von je 30m. Ziel dieser Aufnahmen war es, Grundlagen für eine im Anschluss fotogrammetrisch zu berechnende 3-D-Referenzpunktewolke sowie ein hochauflösendes Orthofoto aufzunehmen. Durch die VAW wurde zwischen 11 und 12.45 Uhr mit einer DJI Phantom 4 inklusive einer Gimbal-stabilisierten On-Board-Kamera geflogen. Videoaufnahmen erfolgten mit einer Auflösung von $4096 \times 2160 \text{ px}^2$ bei 23,98fps (frames per second). Ziel dieser Aufnahmen war es, Detaildaten für eine Airborne Image Bathymetry (AIB), für eine Airborne Image Velocimetry (AIV) und für eine exemplarische BASEGRAIN Anwendung zu erhalten. Die nachstehend beschriebenen Analysen der VAW-Daten für AIB und AIV beziehen sich auf eine einzelne Flugbahn entlang des Talwegs von Feld #0–2 (*Bild 1*) zwischen 11.25 und 11.35 Uhr. Das Foto für die BASEGRAIN-Analyse wurde um 12.35 Uhr aufgenommen.

Ein dichtes Netz von 26 mit Spray markierten ufernahen Bodenreferenzpunkten und 88 Punkten zur Höhe und Lage des Wasserspiegels im Modellperimeter wur-

den durch das Tiefbauamt Basel-Stadt mit einer GNSS Leica Viva GS14 eingemessen.

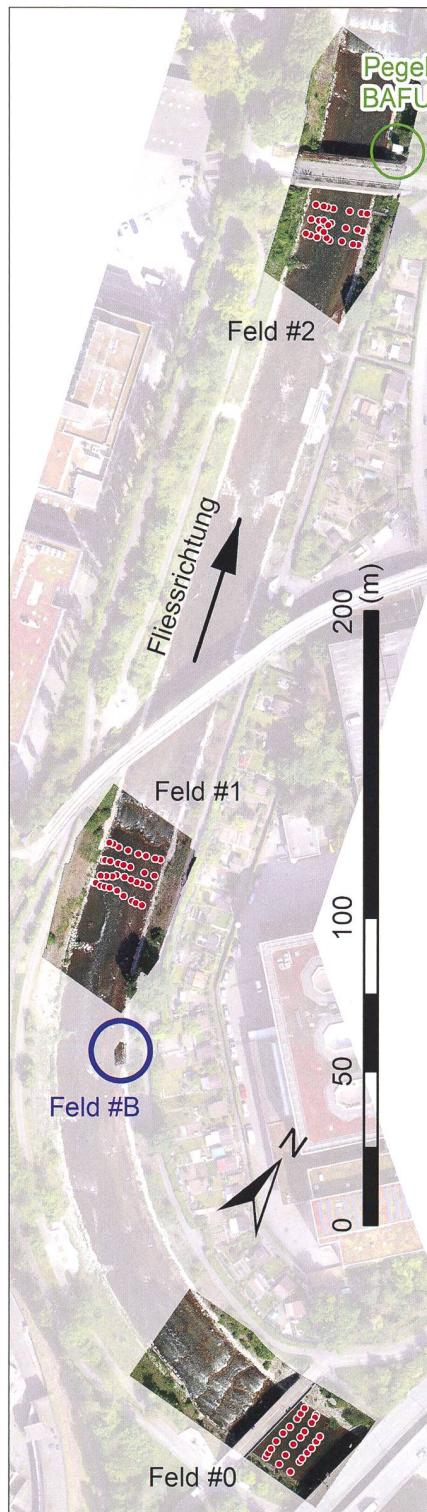


Bild 1: Übersicht Projektperimeter. Felder #0–2 = Bereiche, die für eine Detailanalyse zur Airborne Image Bathymetrie (AIB) und Airborne Image Velocimetry (AIV) gewählt wurden. Feld #B = Bereich für ein Testbild zur luftgestützten Vermessung von Korndurchmessern mittels BASEGRAIN. Rote Punkte = Lage der 78 Sohlreferenzmessungen.

Der Abfluss betrug zum Zeitpunkt der Befliegungen $10,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (BAFU-Pegel #2199, siehe *Bild 1*). Die mit diesem Abfluss verbundenen Fliessgeschwindigkeiten und Wassertiefen waren zu hoch, um Referenzpunkte der Sohle gefahrlos terrestrisch auch im Talweg der Wiese aufzunehmen. Daher wurden erst am Vormittag des 5. Juli 2019 zusätzlich insgesamt 78 3-D-Punktkoordinaten der Gewässersohle terrestrisch mit einer GNSS Leica Viva GS14 aufgenommen. Die Punkte wurden gleichmässig in den drei Bereichen der Felder #0–2 auf je einem Teilabschnitt von ~10 bis 15m Fließrichtungslänge erfasst (*Bild 1*). Der Abfluss war an diesem Tag mit $\sim 2,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ deutlich geringer, und der niedrigere Wasserstand (z.B. $-0,26 \text{ m}$ am BAFU-Pegel im Vergleich zum 16. Mai 2019) und entsprechend geringere Strömungsgeschwindigkeiten sowie Wassertiefen ermöglichen nun die Vermessungsarbeiten. Zwischen diesen beiden Messtagen wurde kein bettildendes Hochwasser verzeichnet. Dementsprechend sind auch keine Veränderungen in der Sohlage zu erwarten; eine Datenhomogenität ist somit gewährleistet.

3. Airborne Image Bathymetry

3.1 Vorgehen

Datenbasis stellen 3-D-Punktwolken dar, welche mittels der Fotogrammetrie-Software Metashape (Agisoft) aus den Befliegungsdaten des Tiefbauamts Basel-Stadt und der VAW berechnet wurden. Angewendet wird hier die sog. Structure-from-Motion-Technik (SfM) zur Schätzung der Kamerapositionen und -blickrichtungen und, quasi als Nebenprodukt, zur Berechnung einer sog. «spärlichen Punktwolke». In Kombination mit einer MultiView-Stereo-Methode (MVS) wird dann die finalen Berechnung einer sog. «dichten Punktwolke» durchgeführt, welche im vorliegenden Fall für die Messungen an der Wiese etwa 200 bis 1000 Punkte m^{-2} aufweist, was vergleichbar ist mit der Punktdichte einer typischen Lidar-Vermessung.

Für die Berechnung der Sohltopografie (Bathymetrie) aus der Punktwolke muss die genaue Wasserspiegellage in jedem Punkt bekannt sein. Dafür empfiehlt Dietrich (2017), aus einzelnen am Ufer gemessenen Punkten der Wasserspiegellage mittels Delaunay-Triangulation zunächst lokal eine abschnittsweise geneigte Ebene der gesamten Wasserspiegellage zu konstruieren. Für Punkte der fotogrammetrischen Punktwolke, welche tiefer liegen als die so geschätzte geneigte Wasserspiegellebene, d.h. für Unterwasserpunkte,

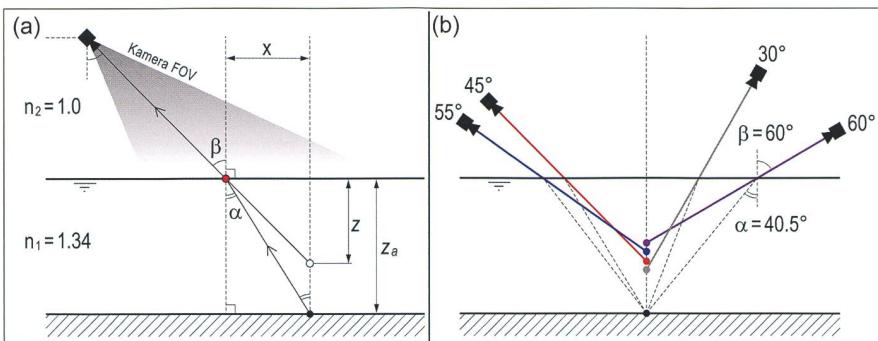


Bild 2: Skizzen zur Refraktion an der Grenzschicht Luft–Wasser (nach Dietrich, 2017). (a) Trigonometrie der Brechungswinkel für eine einzelne Kamera-Punktkombination. (b) Brechungswinkel und scheinbare Tiefenpositionen von vier verschiedenen Bildstrahlen und Kamerapositionen. Die Unterschiede in den scheinbaren Tiefen veranschaulichen eine der Herausforderungen bei der Verwendung mehrerer Kamerastandorte (wie beim hier vorstellten Vorgehen mit SfM-MVS), um die korrekte Tiefe zu ermitteln.

wird dann eine Refraktionskorrektur vorgenommen, wie sie prinzipiell z. B. auch von Friedl *et al.* (2017) für Laborversuche mit einem Laserscanner beschrieben wurde. In Bild 2a und b werden zugehörige geometrische Zusammenhänge dargestellt.

Die Korrektur der scheinbaren Wassertiefe z_a auf die tatsächliche Wassertiefe z ist in Gl. 1 beschrieben.

$$z = \frac{x}{\tan \alpha} = \frac{z_a \tan \beta}{\tan(\sin^{-1}(\frac{n_2}{n_1} \sin \beta))} \quad (\text{Gl.1})$$

Dabei ist α der Einfallswinkel des von der Unterwassersohle reflektierten Lichtstrahls auf die Wasseroberfläche und β dessen Ausfallwinkel im Medium Luft, und $n_1 = 1,34$ sowie $n_2 = 1,0$ sind die Brechungsindizes von Wasser bzw. Luft. Mit dem Ansatz von $\text{Tangens} \approx \text{Sinus}$ für Winkel $\leq \sim 15^\circ$ kann Gl. 1 reduziert werden zu Gl. 2.

$$z = 1.34 z_a \quad (\text{Gl.2})$$

Gl. 2 stellt eine starke Vereinfachung für eine Refraktionskorrektur einer mit SfM-MVS berechneten Punktwolke dar, da bei dieser Technik zur Ermittlung eines Einzelpunktes immer mehrere Kamerastandorte verwendet werden und diese auch Winkel $\geq 15^\circ$ haben können. Gl. 2 entspricht dem Ansatz nach Woodget *et al.* (2015). Die Unterschiede in den scheinbaren Tiefen bei grösseren Winkeln veranschaulicht Bild 2b und werden in Dietrich (2017) ausführlich diskutiert. So unterschätzt Gl. 2 gemäss Gl. 1 die korrigierten Wassertiefen bei (arithmetisch gemittelten) Einfallswinkeln der Bildstrahlen von z. B. $\beta = [15, 30, 45, 60]^\circ$ um $[2, 7, 20, 53]\%$. Dies stellt eine der Herausforderungen bei der Verwendung mehrerer Kamerastandorte (wie beim

hier vorstellten Vorgehen mit SfM-MVS) dar, um die korrekte Tiefe zu ermitteln.

Die Befliegungsrouten am 16. Mai 2019 folgten auf einer mittleren Flughöhe von 80m (Tiefbaumt Basel-Stadt) bzw. von 55m (VAW, in etwa oberhalb der Flussmitte) über der Wasseroberfläche. Bei einer mittleren Gerinnebreite der Wiese von 20 bis 25m ergeben sich für den überwiegenden Teil des Flussbetts Einfallswinkel der Bildstrahlen von $\leq 15^\circ$. Eine vereinfachte Refraktionskorrektur über den Ansatz aus Gl. 2 ist hier also in guter Näherung anwendbar. Die während der Befliegung der Wiese entstandenen maximalen Einfallswinkel β der Bildstrahlen liegen im Bereich von 35° . Ein Fehler durch Unterschätzung der mit Gl. 2 korrigierten Wassertiefen kann zusammen mit Gl. 1 damit auf einen Bereich von 0 bis 10% eingeschränkt werden. Auf eine wie in Dietrich (2017) vorgeschlagene Detailkorrektur unter Berücksichtigung sämtlicher in der SfM-MVS-Berechnung verwendeten Kamera-Punktkombinationen wurde in der aktuellen Studie verzichtet.

3.2 Analyse

Für eine Beurteilung der $\sim 10\text{--}15\text{ m}$ langen Teilbereiche der Felder #0–2, auf denen die Sohle terrestrisch vermessen wurde, wird eine Wassertiefe aus den nächstliegenden Höhen der vermessenen Uferlinie gemittelt. Abweichend von den Empfehlungen nach Dietrich (2017) wird im Folgenden nicht mit einer geneigten Wasserspiegeline gerechnet, sondern vereinfacht lokal auf $10\text{--}15\text{ m}$ Fließstrecke mit einem horizontalen Wasserspiegel. Die

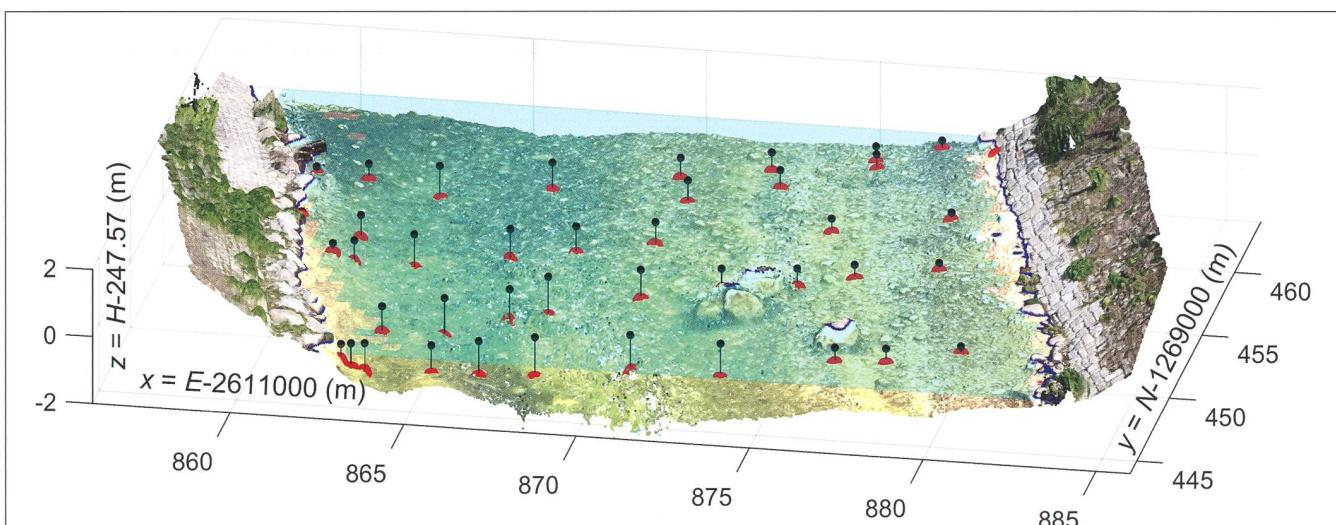


Bild 3: Fotogrammetrisch berechnete 3-D-Punktwolke eines Teilbereichs im Feld #1 (Lage siehe Bild 1) aus dem Datensatz der VAW nach vereinfachter Refraktionskorrektur. Schwarze Punkte = Lage der Sohlenreferenzpunkte aus terrestrischer Vermessung, projiziert auf Höhe der gemittelten Ufer-Wasserspiegellage bei $H = 247,57\text{ m ü. M.}$ (blaue Uferpunkte bzw. hellblaue Ebene). Rote Punkte = Bereich der 100 «Nearest-Neighbour»-Sohlpunkte in refraktionskorrigierter 3-D-Punktwolke. $[E, N] = [\text{East, North}]$ im Schweizer Landeskoordinatensystem LV95. Perspektivischer Blick in Strömungsrichtung.

Schwankung der lokalen Ufer-Wasser- spiegellagen um den Mittelwert liegen für diese Teilabschnitte dann jeweils im Bereich von $\pm 0,02$ m.

Bild 3 zeigt eine exemplarische Darstellung der mittels Gl. 2 refraktionskorrigierten 3-D-Punktwolke aus dem Datensatz der VAW für einen Teilbereich aus Feld #1. Die dort am 4. Juli 2019 vermessenen Sohlpunkte (=schwarze Punkte in *Bild 3*, welche zur Visualisierung auf die Wasserspiegellage projiziert wurden) liegen gleichmässig über die gesamte Gewässerbreite verteilt.

Der verbleibende Fehler der so korrigierten Airborne Bathymetry wird nachstehend anhand eines «Nearest Neighbour»-Kriteriums beurteilt. Gewählt werden hierzu die 100 nächstgelegenen Sohlpunkte aus den refraktionskorrigierten Punktwolken des Tiefbauamts Basel-Stadt und der VAW in Relation zu den terrestrisch in situ vermessenen Sohlpunkten. Relativ zur Lage der Sohlpunkte vom 4. Juli 2019 liegen diese 100 Datenpunkte im Mittel jeweils innerhalb eines Radius von $\sim 0,10$ bis $0,15$ m (siehe rote Punkte in *Bild 3*).

Eine detaillierte Darstellung der Abweichungen der refraktionskorrigierten Punktwolken zu den in situ vermessenen Sohlpunkten wird in *Bild 4* gegeben. In *Bild 4a* ist der jeweilige räumliche Median der Wassertiefe $\langle z_{\text{airborne}} \rangle$ gegen die als Einzelpunkte gemessene Wassertiefe $z_{\text{terrestrial}}$ aufgetragen. In *Bild 4b* sind die Differenzen der Wassertiefen der beiden Methoden dargestellt und ergänzt um das 25- und 75-Perzentil zur Veranschaulichung der Bandbreite. Die Datenbasis stammt hier aus allen drei Bereichen der Felder #0–2 und nutzt zum Vergleich alle 78 terrestrisch vermessenen Sohlpunkte.

Die terrestrisch vermessenen Datenpunkte liegen signifikant tiefer als die aus den Punktwolken des Tiefbauamts Basel-Stadt und der VAW. Eine Geradenanpassung (siehe rote Linie in *Bild 4a*) erfolgt mit

$$z_{\text{terrestrial}} = m \langle z_{\text{airborne}} \rangle - c. \quad (\text{Gl.3})$$

Es ergibt sich (mit 95 %-Konfidenzgrenzen) $m = 1,02 \pm 0,02$ und $c = 0,07 \pm 0,02$ m. Der Korrelationskoeffizient liegt bei $R^2 = 97\%$ und zeigt damit, dass die Tendenz von tiefer liegenden terrestrisch vermessenen Punkten statistisch belastbar ist. Für die Gesamtheit der terrestrischen Vermessungsdatenpunkte, welche nicht tiefer als $z = -1,5$ m unter dem (Ufer-)Wasserspiegel vom Tag der Befliegung liegen, beträgt die Standardabweichung der über Gl. 3 zusätzlich korrigierten Punktwolken dann le-

diglich $\pm 0,05$ m. Diese Tendenzen sind unabhängig davon, ob die Punktwolke der VAW oder die des Tiefbauamts Basel-Stadt verwendet wird. Sie sind damit auch unabhängig von der Drohnen-Kamera-Kombination und den verwendeten Bildsequenzen.

Folgende drei Gründe erklären die Differenz zwischen terrestrischen Vermessungsdatenpunkten und den über Gl. 2 refraktionskorrigierten Werten der Airborne Bathymetry:

1. Eine vereinfachte Refraktionskorrektur über den Ansatz aus Gl. 2 bringt einen Fehler, welcher korrigierte Sohllagen für den aktuellen Fall in einem maximalen Bereich bis 10 % der lokalen Wassertiefe unterschätzt (siehe oben). Gemäss Parameter m liegt dieser Wert für die aktuelle Anwendung im Mittel bei $2 \pm 2\%$ (entsprechend im Mittel $\beta = 15^\circ$).
2. Während der Messstab bei der terrestrischen Vermessung tendenziell eher in die Kornzwischenräume bzw. in die (lockere) Kies-Sand-Sohle versinkt, neigen photogrammetrische 3-D-Punktwolken (berechnet auf Basis charakteristischer Bildpunkte, welche aus verschiedenen Blickwinkeln sichtbar sein müssen) eher dazu, die obersten Erhebungen zu messen. Eine ingeniermässige Abschätzung für die Sohle der Wiese im Untersuchungsbereich lässt eine Differenz von 0,02 bis 0,05 m, d.h. in der geschätzten Grösse der mittleren Korndurchmesser der Sohle, plausibel erscheinen. Dieser Wert kann einen Anteil am Parameter c erklären.

3. Gemäss der 1-D-Arbeits-Energie-Gleichung führt eine höhere Fließgeschwindigkeit auch zur Absenkung des Wasserspiegels. Eine Grössenordnung hierfür gibt die Energiehöhe aus $\sqrt{(U^2 + V^2)} (2g)^{-1}$, mit $\sqrt{(U^2 + V^2)} =$ (zeit- und tiefengemittelte) Fließgeschwindigkeit und $g = 9,81 \text{ m s}^{-2} =$ Erdbeschleunigung. Damit lässt sich bei (lokalen) Fließgeschwindigkeiten von bis zu $1,5 \text{ m s}^{-1}$ (siehe Kap. 4) eine Abweichung der Wasserspiegellage im Vergleich zum gemessenen Wert am Ufer erklären. Tatsächlich sind unter realen 3-D-Bedingungen weder der Wasserspiegel noch eine virtuelle Energie- linie entlang eines Gewässerquerschnitts horizontal. Eine grobe, ingeniermässige Schätzung für die Randbedingungen der Wiese im Untersuchungsbereich lässt damit eine mittlere Differenz von 0 bis 0,05 m aufgrund Fließgeschwindigkeitsbedingt lokal geänderter Wasserspiegellage plausibel erscheinen.

Dieser Wert kann einen weiteren Anteil am Parameter c bzw. an dessen Schwankungsbereich erklären. Des Weiteren haben Oberflächenwellen, Weisswasser und weitere Lichtreflektionen einen negativen Einfluss auf die Güte des Messsignals, insbesondere in schneller fließenden Bereichen, und führen zu einer hohen Streuung der möglichen Sohllage. Eine Annahme einer lokal ebenen Wasseroberfläche zur Anwendung einer Refraktionskorrektur ist dann nicht mehr gültig.

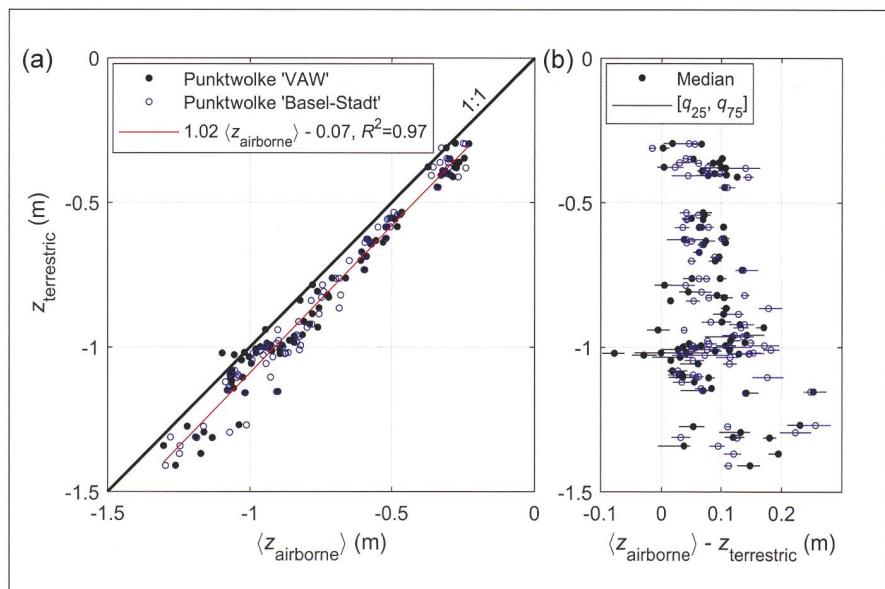


Bild 4: Sohllagen $\langle z_{\text{airborne}} \rangle$ der mit Gl. 2 refraktionskorrigierten Punktwolke in Relation zu Sohllagen $z_{\text{terrestrial}}$ aus Daten der terrestrischer Vermessung. (a) 1:1-Plot mit Punktwolkedaten von VAW und Basel-Stadt. (b) Abweichungen als Median und 25- bzw. 75-Perzentile von je 100 Nearest-Neighbour-Punkten.

Für eine Anwendung des hier vorgestellten Verfahrens einer bildbasierten Airborne Bathymetry ist immer eine Vermessung der lokalen Wasserspiegellage notwendig. Anstelle einer aufwendigen terrestrischen In-situ-Vermessung bietet sich an, die Wasserspiegellage am Ufer automatisiert über den Grenzbereich nass/trocken mittels Computer-Vision-Techniken im 2-D-Orthofoto zu bestimmen und diesen 2-D-Punkten eine Höhenkoordinate über die 3-D-Punktwolke zuzuordnen. Ein solcher Ansatz wurde im Rahmen dieser Arbeit getestet, konnte aber nicht mit einem hinreichend cm-genauen Messergebnis und einer robusten Anwendung implementiert werden. Der Ansatz wurde daher nicht weiterverfolgt. Für eine praktische Wasserspiegeldetektion erscheint es zielgerichteter, die Uferlinien direkt in Metashape (Agisoft) über das dortige 3-D-Punkt-Digitalisierungstool manuell zu bestimmen und optional mit terrestrischen In-situ-Messungen zu ergänzen.

3.3 Diskussion

Die präsentierte Methode zur Airborne Bathymetry stellt für die hier getesteten Wassertiefen bis zu $z = -1,5$ m eine echte Alternative zur üblichen terrestrischen Punktvermessung dar, aber auch zu akustischen Messtechniken wie z. B. der Sohlvermessung als Nebenprodukt aus Acoustic Doppler Velocimetry (ADV). So war es bei den Abflussverhältnissen am Tag der Befliegung unmöglich, eine terrestrische Sohlvermessung durchzuführen. Ebenso hätte eine Vermessung mittels ADV-Boot aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten eine grosse Herausforderung dargestellt und ist in Flachwasserbereichen bis $z = -0,2$ m nicht sinnvoll einsetzbar. Auch die Dichte von 200 bis 1000 Punkte m^{-2} auf einer gesamten Fliessstrecke von 500 m, welche mit einem Flug von etwa 10 min erfasst wurde, steht diametral der Anzahl von (nur) 78 Punkten entgegen, welche terrestrisch im Fluss an einem ganzen Vormittag vermessen wurden.

Tatsächlich gibt eine vereinfachte Refraktionskorrektur nach Gl. 2 tendenziell zu flache Wassertiefen im Vergleich zu terrestrischer Punktvermessung. Nicht berücksichtigt werden im Wesentlichen die drei Faktoren, welche sonst eher zu leicht tieferen Sohlpunkten führen würden. Dessen Größenordnungen können gut abgeschätzt und damit korrigiert werden. Im vorliegenden Fall bringt eine Korrektur über $z = 1,02 (1,34 z_a) - 0,07$ (m) eine gute Übereinstimmung mit 78 terrestrisch vermessenen Sohlpunkten bei einer dann noch verbleibenden Standardabweichung von $\pm 0,05$ m für den Einzelpunkt.

Eine präzisere Beschreibung der Korrektur kann erreicht werden, wenn die exakten Bildstrahlwinkel, Sohlrauigkeiten (z. B. mittels BASEGRAIN) und Fliessgeschwindigkeiten (z. B. mittels Airborne Velocimetry) explizit ermittelt und lokal bei der Korrektur der Punktwolke berücksichtigt werden.

Einsatzbereiche für die hier vorgestellte Methodik sind alle Anwendungen, bei denen absolute cm-Genauigkeit nicht gefordert ist, wie z. B. zur Erfassung der abiotischen Faktoren im Rahmen eines Gewässermonitorings bei Revitalisierungen (vgl. Weber et al., 2020) und bei sonstigen Beurteilungen eines Gewässers im Istzustand anhand eines «Big Pictures».

4. Airborne Velocimetry

4.1 Vorgehen

Die grundsätzliche Prozedur zu Messung und Auswertung mittels Airborne Velocimetry wird z. B. in Detert und Weitbrecht (2015) bzw. Detert et al. (2015, 2017) beschrieben. Darüber hinausgehende Informationen zu den Messungen und Auswertungen für die Situation an der Wiese werden nachstehend gegeben.

Während der Messung wurden insgesamt zehn 250-l-Säcke eines Tracermaterials zugegeben (unbehandelte Maisstärkeflocken, FILL-PAC Bio der Firma MEDEWO, Schweiz). Aufgrund der komplexen Situation der Wiese mit 90° Rechtskurve und diversen (Buhnen-bedingten) Rückströmungszonen standen vor Ort vier Personen für die Zugabe zur Verfügung. Während der Messungen folgte der Quadrocopter der VAW dem Schwerpunkt der Seedingwolke entlang des Talwegs. Das Kamerablickfeld erfasste dabei je einen Fliessweg von etwa 50 m Länge.

Für die Bildkalibrierung und Georektifizierung wurde ein Verfahren angewendet, welches die bisherigen Ansätze nach Detert und Weitbrecht (2015) bzw. Detert et al. (2015, 2017) vereinfacht. Eine intrinsische Bildkalibrierung erfolgt auf Basis eines direkt vor Ort vor der Messung aufgenommenen Kalibrierungsbretts mit Schachbrettmuster. Nach diesem Kalibrierungsschritt erscheinen in Natur gerade Linien auf den so rektifizierten Einzelbildern auch wieder gerade. Die verbleibende Verzerrung des Bildes ist dann in guter Näherung nur noch auf eine perspektivische Verzerrung aufgrund der nicht perfekt lotrechten Kameraorientierung zurückzuführen. Die so korrigierten Aufnahmen werden auf ein vorhandenes Basis-Orthofoto mittels Punktematching von sog. KAZE-Featurepoints (Alcadrilla et al., 2012) referenziert, wobei

eine vorab zu definierende Bildmaske nicht-ufernahe Bildbereiche ausblendet. Bild 5 zeigt exemplarisch ein Beispiel. Auf diese Weise wird jedes Einzelbild in guter 2-D-Näherung auf die Höhe der Wasseroberfläche projiziert. Für jedes Einzelbild wird eine entsprechende projektive Transformationsmatrix ermittelt. Die Koordinaten der Bildeckpunkte werden entlang ihrer Zeitreihe geglättet, um Ausreisser herauszufiltern. Erst danach wird jedes Einzelbild final umgerechnet und erneut als Video abgespeichert, nun jedoch mit bekannter Georeferenz, gleichem Bildausschnitt und gleicher Rasterauflösung wie das Basis-Orthofoto.

Um den für die obigen Schritte benötigten Rechenaufwand zu minimieren, wird dieses Verfahren einzeln auf die drei Bereiche der Felder #0–2 angewendet. Am Ende der Bildkalibrierung und Georektifizierung liegen somit drei georeferenzierte Videos entsprechend den Bereichen der Felder #0–2 vor, welche im nächsten Schritt zur bildbasierten Berechnung der Oberflächengeschwindigkeit zur Verfügung stehen.

Die Oberflächengeschwindigkeiten der Wiese wurden unter Verwendung der georeferenzierten und gefilterten Videos anhand eines Particle-Image-Velocimetry-(PIV-) Algorithmus bestimmt. Verwendet wird ein Kreuzkorrelationsverfahren zwischen zwei Bildpaaren mit bekannter Zeitschrittweite. Dabei wird die Verschiebung von mehreren Partikeln bzw. Intensitätsmustern analysiert und werden die daraus ermittelten Geschwindigkeitsvektoren auf einem Raster dargestellt. Damit ist das gesamte Geschwindigkeitsfeld in Zeit und Raum diskretisiert, was im Vergleich zu Ergebnissen aus typischen Punktmessungen ein deutliches Mehr an Information bei deutlich kürzerer Messdauer darstellt.

Im vorliegenden Fall wurde die MATLAB-basierte Open-Source-Software PIVlab (Thielicke und Stamhuis, 2014) genutzt, um die Geschwindigkeiten zu bestimmen. Die Bildanalyse wurde an Bildsequenzpaaren von [(1:5), (5:9), (9:13) ...] durchgeführt, um einen hinreichenden Zeitversatz von $\Delta t = 0,25$ s zu erreichen. So werden Fehler aufgrund von unzureichend kleinen Partikelverschiebungen minimiert. Der PIV-Algorithmus wurde auf einem finalen Gitter von $64 \times 64 \text{ px}^2$ mit 50 % Überlappung angewendet. Mit einer Rasterskala von 64 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 und einer zeitlichen Auflösung von 6 fps (frames per second).

4.2 Analyse

Bild 6 und *Bild 7* zeigen exemplarische Ergebnisse für den Bereich des Feldes #1. Klar erkennbar ist der Talweg mit einer Strömungskonzentration und Geschwindigkeiten $> 1 \text{ m s}^{-1}$. Weiter werden auch die strömungsberuhigten Bereiche unterstrom im Lee von Störsteinen im rechten Drittel der Strömung deutlich. Die Rückströmungszone unterstrom der Buhne am linken Ufer zeigt Geschwindigkeiten mit bis zu $-0,5 \text{ m s}^{-1}$, d.h. entgegen der Hauptströmungsrichtung.

Eine Herausforderung sind Weisswaserszonen wie an den Schwellen (*Bild 6* z.B. bei $y=50 \text{ m}$) sowie unzureichend mit Seeding abgedeckte Bereiche, insbesondere solche mit geringer Strömungsgeschwindigkeit. Weiter überblenden Sonnenreflektionen einzelne Videobilder und sorgen für Fehlvektoren. Auch der Schattenwurf von Bäumen bzw. Brücken bringt Herausforderungen durch Reflexion von Oberflächenwellen, insbesondere an der Schattengrenze. Scheinbare Oberflächengeschwindigkeiten im trockenen Uferbereich, d.h. ausserhalb des Fliessquerschnittes, sind auf ungenaue Orthorektifizierung zu-

rückzuführen. Eine einfache Maske könnte hier verwendet werden, um diese «Landvektoren» zu löschen. Auf diese Korrektur wurde aber aus Demonstrationsgründen für diese Publikation verzichtet. Ein vergleichbares Rauschen durch imperfekte Orthorektifizierung für den tatsächlichen Fliessbereich wird bei Analyse eines längeren zeitlichen Mittels und bei deutlich grösseren Fliessgeschwindigkeiten weggefiltert.

4.3 Diskussion

Die Anwendung der Airborne Image Velocimetry hat deutliches Potenzial, um herkömmliche Techniken wie ADV oder punktuelle Flügelmessung sinnvoll zu ergänzen oder auch teilweise zu ersetzen. Sie ermöglicht, ein «Big Picture» der Strömungssituation zu erhalten, welches unter vergleichbarem Aufwand nicht mit anderen Techniken möglich ist. Allerdings ergibt die Airborne Image Velocimetry stets «nur» die Geschwindigkeit an der Oberfläche, nicht aber die tiefengemittelte Geschwindigkeit, welche z. B. bei einer geraden Kanalströmung näherungsweise 80–90 % der Oberflächengeschwindigkeit beträgt. Eine echte Vermessung von vertikalen Geschwin-

digkeitsprofilen wie bei Flügelmessung oder ADV ist nicht möglich. Es kann lediglich eine Schätzung unter Berücksichtigung von Wassertiefe und Sohlrauigkeit bei gerader Fliessstrecke vorgenommen werden. Bei komplexen 3-D-Strömungssituationen (z. B. starke Kurvenströmung, Störströmung hinter Buhnen) ist die Aussagekraft zum vertikalen Geschwindigkeitsprofil gering.

Erfahrungen der VAW zeigen, dass die Airborne Image Velocimetry hinsichtlich Genauigkeit in etwa den gleichen kleinen Fehlerbereich wie Referenzmessungen mit Flügelmessung oder ADV-Techniken erreicht. Massgeblich für die Genauigkeit einer Airborne Image Velocimetry ist die Güte der detektierbaren Oberflächenstrukturen (gegeben durch Seeding-Partikel und/oder natürliches «Seeding» wie Luftblasen, Reflexionen von Oberflächenwellen oder organischem Material wie Blättern, Ästen etc., welche der Strömung folgen). Wie z.B. Untersuchungen nach Carrel et al. (2020) zeigen, können Schrägwinkelansichten der Kamera und Gegenlichteffekte die Reflexionen von Oberflächenwellen stärker hervorheben, sodass unter günstigen Randbedingungen auch auf die Zu-

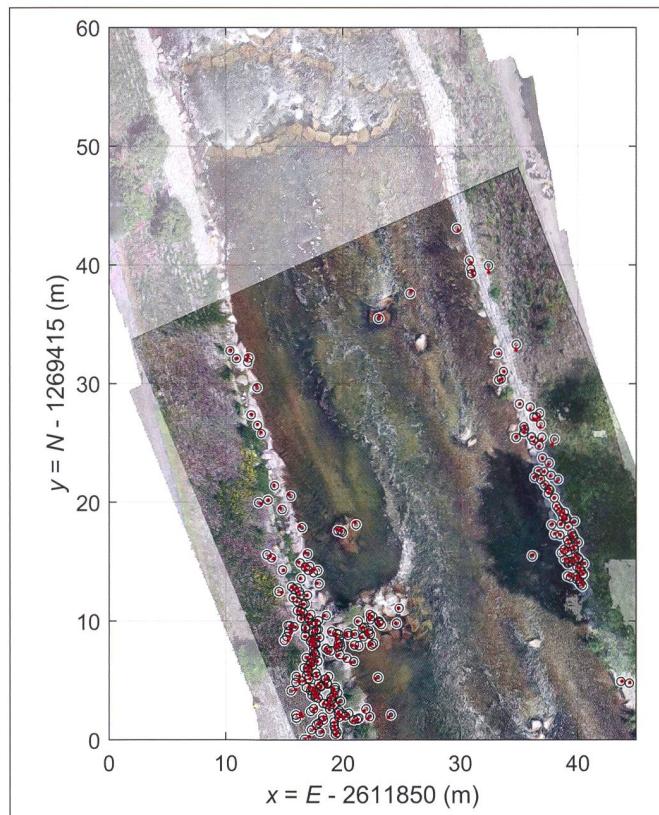


Bild 5: Exemplarische Orthorektifizierung eines Videoeinzelbildes im Bereich des Feldes #1 (dunkler Bildbereich im Vordergrund) auf ein vorhandenes Orthofoto (heller Bildbereich im Hintergrund) mittels Punktmatching von KAZE-Featurepoints (rote Punkte bzw. schwarze Kreise). Zur Übersichtlichkeit wurde hier nur jedes zehnte Punktpaar dargestellt.

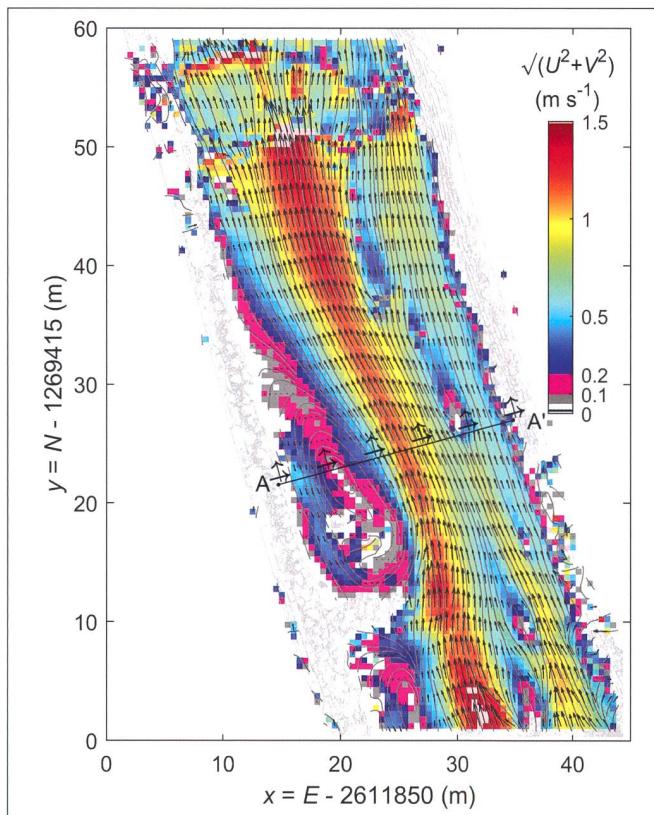


Bild 6: Zeitlich gemittelte Oberflächengeschwindigkeiten, Vektoren und Stromlinien im Feld #1 (siehe Bild 1), mit $[U, V] = \text{Oberflächengeschwindigkeiten in Richtung } [E, N]$.

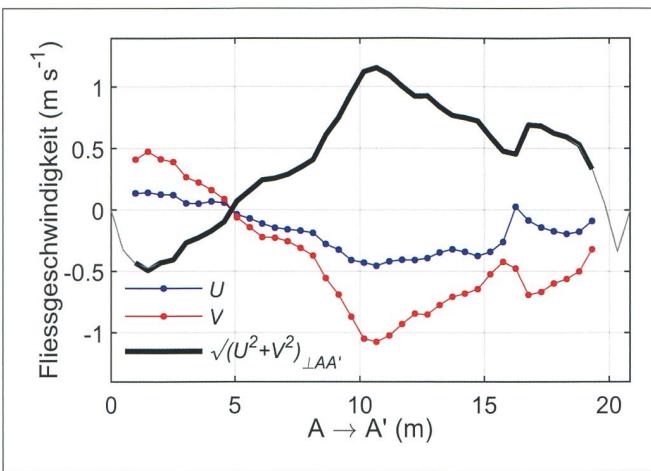


Bild 7:
Strömungs-
geschwindig-
keiten im
Querprofil A–A'
(siehe Bild 6).

gabe des Seeding-Materials verzichtet werden kann. Herausfordernde Randbedingungen ergeben sich durch starke Sonnenreflexionen (Überblendung), stehende Wellen (Weisswasser), Schattenkanten und auch ungenaue Bildreferenzierung.

Mit Vorliegen des georeferenzierten Geschwindigkeitsfelds und den damit verbundenen lokalen Abweichungen des Wasserspiegels im Vergleich zum Uferwasserspiegel kann auch dessen korrekter Einfluss auf die Technik der Airborne Image Bathymetry optimiert werden. Zusätzlich kann die Schätzung des Abflusses über die Oberflächengeschwindigkeit an mehreren Querprofilen (vgl. Bild 7), im vorliegenden Fall auch in Relation mit dem an der BAFU-Pegelstation gemessenen Abfluss, eine Aussage über die integrale Güte von Airborne Image Velocimetry und Bathymetry geben.

Einsatzbereiche für die hier vorgestellte Methodik der Airborne Image Velocimetry liegen im Rahmen eines Gewässermonitorings bei Revitalisierungen (vgl. Weber et al., 2020), Beurteilungen der Strömungsverhältnisse bei Wasserbauwerken anhand eines «Big Pictures», Analysen von Hochwassereignissen, Schätzungen von Abflussraten sowie Grundlagenermittlungen für mehrdimensionale hydronumerische Modelle.

5. Airborne Gravimetry

5.1 Vorgehen

BASEGRAIN ist ein MATLAB-basiertes Tool zur automatischen Objekterkennung mit dem Ziel einer granulometrischen Analyse von Draufsichtfotos von Flusskiesbetten. Es wurde an der VAW entwickelt, Details können Detert und Weitbrecht (2012, 2013) entnommen werden. BASEGRAIN wird über eine grafische Benutzeroberfläche verwaltet, welche auch ein Pre- und Postprocessing ermöglicht. Eine Korngrößenverteilung wird über die Linienzahlanalyse nach Fehr berechnet (VAW, 1987). Alternativ

kann eine Korngrößenverteilung auch abgeleitet werden, indem Informationen von jeder detektierten Kornfläche und ihrer zugehörigen a - und b -Achse verwendet werden. Wenn Fotos mit Geotags analysiert werden, erfolgt eine automatische Georeferenzierung der Analyseergebnisse. Ergebnisse können als Tabellen- und GIS-Formate exportiert werden.

Ursprüngliches Ziel der Anwendung von BASEGRAIN an der Wiese war, dessen Anwendbarkeit auf luftgestützte Bildaufnahmen für ausgewählte, trockene Uferbereiche zu demonstrieren. Tatsächlich konnte während der Befliegung am 16. Mai 2019 aufgrund eines erhöhten Wasserstands kein adäquater trockener Sohlbereich ausfindig gemacht werden. Lediglich am unterstromigen Innenufer der grossen Rechtskurve im Untersuchungsperimeter konnte eine Kiesfläche von nur etwa 2 m^2 aufgenommen werden, welche für eine BASEGRAIN-Analyse bedingt geeignet erschien. Tatsächlich lag auf dieser Fläche ein bimodales Kornmaterial mit Grobkie und hohem Schlammanteil, was zur Demonstration der gesamten Anwen-

dungsbreite von BASEGRAIN nur suboptimal ist. Die nachfolgende Analyse beschränkt sich daher nur auf eine rudimentäre Darstellung des Vorgehens für eine BASEGRAIN-Anwendung auf Basis luftgestützter Bildaufnahmen.

5.2 Analyse

Eine Georeferenzierung inklusive projektiver Transformation und Skalierung auf $1/640\text{ mm px}^{-1}$ wurde über handisch digitalisierte Passpunkte vorgenommen. Bild 8 illustriert die mittels BASEGRAIN detektierten und vermessenen 393 Kieskornflächen mit b -Achsen $> 10\text{ mm}$, wobei z.B. das Größtkorn mit $b = 169\text{ mm}$ vermessen wurde. Der unterwasserliegende Bereich der Kiessohle im unteren Bildbereich musste für die Korngrößenberechnung ausgewählt werden. Die Wasseroberfläche wurde durch den Abwind der Quadrokopterrotoren unruhig, sodass durch die Wasseroberfläche keine durchgängig klaren Kieskornkonturen sichtbar waren.

5.3 Diskussion

Messtechnisch erscheint die Anwendung einer Airborne-Gravimetry-Technik machbar. Eine Korngrößenanalyse zur Ermittlung einer kompletten Sieblinie ist mit den vorliegenden Aufnahmen an der Wiese jedoch nur begrenzt sinnvoll, da der Schlammanteil am Gesamtvolume der bimodalen Mischung nicht mit dem vorliegenden Datensatz bestimmbar ist. Eine Sieblinie wurde daher nicht ermittelt. Gleichwohl könnte hier ein Ansatz verfolgt werden, bei dem (i) der Volumenanteil des Feinmaterials über den Flächenanteil abgeschätzt und (ii) die Kornverteilung des Feinmaterials getrennt über Nah- bzw. Mikroskopaufnahmen ebenfalls mit BASEGRAIN bestimmen wird und (iii) die Kurven für Grob- und Fein-

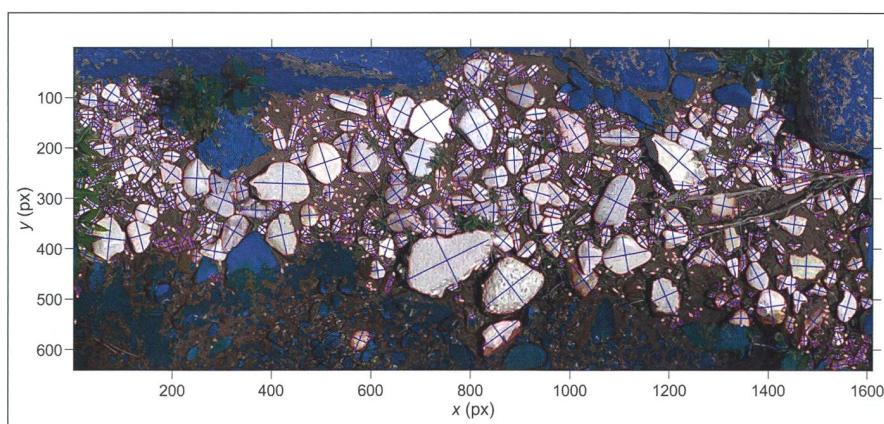


Bild 8: BASEGRAIN-Darstellungen des Testbereichs Feld #B (Lage siehe Bild 1). Foto mit Skalierung $1/640\text{ px m}^{-1}$, d.h. mit Abmessung $1,0 \times 2,5\text{ m}^2$. Darstellung von detektierten und vermessenen Kiesflächen, wobei die blauen Achsen jeweils die Haupt- und Mittelachse einer quasi-flächengleichen Ellipse wiedergeben.

material mittels Best-Fit überlagert wird. Auf diese Weise könnte hier eine finale Sieblinie geschätzt werden.

Das hier demonstrierte Verfahren einer BASGRAIN-basierten Airborne Gravelometry kann genutzt werden, um Ansätze nach *Buscombe (2020)* und *Irninger et al. (2020)* zur flächigen Schätzung charakteristischer Korndurchmesser effektiver zu kalibrieren. Einsatzbereiche für diese Technik sind im Wesentlichen Gewässermonitorings vor und nach Revitalisierung und das Erhalten von Grundlagen für morphodynamisch-hydroneumatische Modelle.

6. Synthese

Die vorliegende Untersuchung an der Wiese zu Airborne Bathymetry, Airborne Image Velocimetry und Airborne Gravelometry zeigt das hohe Potenzial dieser drei Messtechniken, um im Rahmen von Monitorings einen kostengünstigen und guten qualitativen Überblick zu einem «Big Picture» eines Momentzustandes des Gewässers zu erhalten. Alternative, klassische Punktaufnahmemethoden im Feld wie mittels terrestrischer Vermessung, Flügelmessung, ADV oder Sieblinienanalysen könnten (teilweise) höhere Genauigkeiten liefern, füh-

ren jedoch nicht mit einer vergleichbaren Effizienz zum finalen Ergebnis eines Gesamtbilds eines Gewässerabschnitts. Zudem sind bildbasierte Methoden berührungslos anwendbar, d.h., sie stören weder Flora und Fauna noch die Gewässermorphologie. Sie sind auch geländeunabhängig unter Randbedingungen einsetzbar, bei denen konventionelle Methoden nur mit grossem Aufwand oder gar nicht einsetzbar sind, wie z.B. im Hochwasserfall (Lebensgefahr für Messpersonal) oder in Niederwasserzonen (ADV-Messungen nicht möglich).

Wie jede Messtechnik hat auch das bildbasierte Messen für die Erfassung eines Gewässers Grenzen. Eine Vermessung der Sohltopografie ist nur dann durchführbar, wenn auch markante Punkte des Gewässergrundes durch den Wasserkörper sichtbar sind. Weiter können Fließgeschwindigkeiten praktisch nur an der Oberfläche ermittelt werden und auch nur dann, wenn künstlicher Tracer (z.B. Maisstärkeflocken) oder natürliche Strukturen auf der Wasseroberfläche (z.B. turbulenzinduzierte Wellen) sichtbar mit der Strömung mitgetragen werden.

Aktuell werden bildbasierte Systeme zur Gewässervermessung nur wenig eingesetzt. Der Grund liegt (i) im geringen Wissen um diese Techniken, (ii) teilweise

in der mangelnden Akzeptanz infolge unbekannter Fehlergrößen und (iii) im nur gering verfügbaren Know-how bei den potenziellen Anwendern. Zudem sind (iv) Best-Practice-Richtlinien inkl. Softwarelösungen zur Bildanalyse auf den Stand der Wissenschaft, aber nicht auf den Stand der Technik. Damit erklären sich auch (v) die Kosten, die noch nicht unterhalb der einer konventionellen Vermessung liegen. Es fehlen damit Referenzprojekte, aus denen Fehlergrößen bestimmt, vorhandene Analysetools optimiert und Erfahrungen publiziert und in Lehrgängen weitergegeben werden können.

Mit der Durchführung dieser Schritte wird der Ingenieur, Hydrologe und Biologe jedoch zukünftig über ein effektives kostengünstiges Instrument verfügen, welches vielfältig eingesetzt werden kann: für Gewässermonitorings im Rahmen von Revitalisierungen, zur Beurteilung der Strömungsverhältnisse bei Wasserbauwerken anhand eines «Big Pictures» im Istzustand, für Hochwasserereignisanalysen, für Schätzungen von Abflussraten sowie zur Grundlagenermittlung für mehrdimensionale hydroneumatische Modelle.

Quellen:

- Alcantarilla, P.F., Bartoli, A., and Davison, A.J. (2012). KAZE features. European Conference on Computer Vision (pp. 214–227). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Buscombe, D. (2020). SediNet: a configurable deep learning model for mixed qualitative and quantitative optical granulometry. *Earth Surface Processes and Landforms* 45, 638–651. doi:10.1002/esp.4760
- Carrel, M., Peña-Haro, S., Lüthi, B., Lukes, R. (2020). Bildgebende Durchflussmessung in einem breiten Gewässer mittels eines Multi-View-Systems. *Wasser Energie Luft* 112(1), 21–426.
- Detert, M., Weitbrecht, V. (2012). Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. *River Flow 2012*, R.M. Muños (Ed.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62129-8, 595–600.
- Detert, M., Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. *Advances in Science and Research*, S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi, H. Zhang (Eds.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9, 1789–1795.
- Detert, M., Weitbrecht, V. (2015). A low-cost airborne velocimetry system: Proof of concept. *Journal of Hydraulic Research* 53(4), 532–539. doi:10.1080/00221686.2015.1054322
- Detert, M., Trachsel, J., Weitbrecht, V. (2015). Quadro-kopterbasierte Messung von Oberflächen-geschwindigkeiten. *Wasser Energie Luft* 107(3), 211–217.
- Detert, M., Johnson, E.D., Weitbrecht, V. (2017). Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing* 38(8–10), 2780–2807. doi:10.1080/01431612017.1294782
- Dietrich, J.T. (2017). Bathymetric Structure from Motion: Extracting stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms* 42(2): 355–364. doi:10.1002/esp.4060
- Fehr, R. (1987). Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mithilfe der Linienzählanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 105(38), 1104–1109.
- Friedl, F., Schneider, J., Hinkelammert, F., Weitbrecht, V. (2018). Through-water terrestrial laser scanning in hydraulic scale models: proof of concept. *Journal of Hydraulic Research*, 56(4), 551–559, doi:10.1080/00221686.2017.1372820
- Irninger, A., Rozniak, A., Lang, N., Wegener, J.D., Schindler, K., Hunziker, R. (2020). Automatische, bildbasierte Kornverteilungsanalysen mittels neuronaler Netzwerke. *Tagungsband Wasserbau-Symposium 2020/2021*, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) (accepted).
- KOHS (2013). Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen – Empfehlungen der Kommission Hochwasserschutz (KOHS), Wasser Energie Luft, 105(1), 2013, 43–53.
- Thielicke, W., Stamhuis, E.J. (2014). PIVlab: Time-resolved digital Particle Image Velocimetry tool for MATLAB (version: 1.35). <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>
- Weber, C., Sprecher, L., Åberg, U., Thomas, G., Baumgartner, S., Haertel-Borer, S. (2020). Wirkungskontrollen mit Wirkung: Gemeinsam lernen für Revitalisierungen. *Wasser Energie Luft* 112(1), 41–47.
- Westoby, M., Dunning, S., Woodward, J., Hein, A., Marrero, S., Winter, K., Sugden, D. (2015). Sedimentological characterization of Antarctic moraines using UAVs and Structure-from-Motion photogrammetry. *Journal of Glaciology* 61(230), 1088–1102. doi:10.3189/2015JoG15J086
- Woodget, A., Carboneau, P. E., Visser, F., Maddock, I.P. (2015). Quantifying Submerged Fluvial Topography Using Hyperspatial Resolution UAS Imagery and Structure from Motion Photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 47–64. doi:10.1002/esp.3613.

Autoren:

- Martin Detert, Projektleiter Hydrografie und 3-D-Geodatenmanagement, Meisser-Vermessung AG, Rheinfelsstr. 2, 7000 Chur, Schweiz; ehemals Wiss. Mitarbeiter Abteilung Flussbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich, Schweiz. martin.detert@meisser-geo.ch
- Andreas Prokoph, Projektleiter Hydrografie, Bau- und Verkehrsdepartement Basel-Stadt, Tiefbauamt, Infrastruktur – Planung, Dufourstr. 40, CH-4001 Basel, Schweiz. andreas.prokoph@bs.ch
- Guido Derungs, Fachverantwortlicher Gewässer und Naturgefahren, Bau- und Verkehrsdepartement Basel-Stadt, Tiefbauamt, Infrastruktur – Planung, Dufourstr. 40, CH-4001 Basel, Schweiz. guido.derungs@bs.ch
- Volker Weitbrecht, Leiter Abteilung Flussbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich, Schweiz. weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch