

**Zeitschrift:** Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =  
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =  
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

**Herausgeber:** geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und  
Landmanagement

**Band:** 113 (2015)

**Heft:** 9

**Artikel:** Nutzung von Drohnen und Luftbildern in der Siedlungswasserwirtschaft

**Autor:** Tokarczyk, Piotr / Leitao, Joao Paulo / Rieckermann, Jörg

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-513919>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 05.05.2025

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

# Nutzung von Drohnen und Luftbildern in der Siedlungswasserwirtschaft

P. Tokarczyk, J.P. Leita, J. Rieckermann,  
K. Schindler, F. Blumensaat

Vor dem Hintergrund von zunehmender Urbanisierung, Klimawandel und alternder Infrastrukturen gewinnt die Analyse und Bewertung von Überflutungen im urbanen Raum aufgrund von Starkregenereignissen zunehmend an Bedeutung. Dazu sind Modelle erforderlich, die das Niederschlag-Abflussverhalten in einem angemessenen zeitlichen und räumlichen Detail beschreiben. Neben Daten zur Menge und Verteilung des Niederschlags gehen in die Modellierung auch Oberflächeneigenschaften ein, insbesondere der Versiegelungsgrad und die Flächennutzung. In dieser Studie untersuchen wir erstmals die Möglichkeit, hochauflösende Landnutzungskarten städtischer Gebiete aus Drohnen(UAV)-Bildern abzuleiten und die Eignung solcher Karten als Datengrundlage für Modellanwendungen in der Siedlungswasserwirtschaft. Wir zeigen, dass die aus UAV-Bildern (automatisch) abgeleiteten Karten zum Versiegelungsgrad hinsichtlich ihrer Genauigkeit mit Karten auf Basis konventioneller Luftbilder vergleichbar sind. Darüber hinaus zeigt sich in unseren Experimenten, dass sich die Genauigkeit der Versiegelungskarten bedeutend steigern lässt, indem man diskriminative Lernverfahren in Verbindung mit Bildinformation aus einer grösseren Nachbarschaft benutzt.

*Au vu de de l'urbanisation croissante, du changement climatique et des infrastructures vieillissantes l'analyse et l'évaluation d'inondations en zone urbaine suite à des événements de forte intensité gagnent en importance. Cela requiert des modèles qui décrivent le comportement entre précipitations et écoulements dans des détails temporels et spatiaux appropriés. En plus de données concernant le volume et la répartition de la précipitation des caractéristiques de la surface entrent également dans la modélisation notamment le degré d'imperméabilisation et l'affectation des surfaces. Dans cette étude nous avons examiné pour la première fois la possibilité de décliner des cartes d'affectation de surfaces urbanisées à haute définition à partir d'images de drones (UAV) et de tester leur aptitude de données de base pour l'application de modèles dans l'économie des eaux en zones bâties. Nous pouvons démontrer que les cartes extraites (automatiquement) d'images UAV sont comparables en ce qui concerne leur précision avec des cartes d'images aériennes conventionnelles. En plus il découle de nos études que la précision des cartes d'imperméabilisation peut être considérablement augmentée en utilisant des processus d'apprentissage discriminatifs en combinaison avec des informations d'images d'un plus grand voisinage.*

Alla luce della crescente urbanizzazione, del cambiamento climatico e delle infrastrutture obsolete, l'analisi e la valutazione delle esondazioni negli spazi urbani assumono sempre più importanza a causa degli eventi di piogge torrenziali. Al riguardo, sono necessari dei modelli che descrivano il comportamento del deflusso delle precipitazioni, con tanto di dettagli cronologici e spaziali utilizzabili. Oltre ai dati sulla quantità e sulla ripartizione delle precipitazioni, la modellizzazione deve tenere debito conto anche delle caratteristiche della superficie e, in particolare, del grado di sigillatura e dell'utilizzazione delle superfici. In questo studio, esaminiamo per la prima volta la possibilità di estrapolare dalle immagini UAV, scattate dai droni, delle carte ad alta risoluzione sull'utilizzazione del suolo. Inoltre, intendiamo verificare l'idoneità di queste carte come base dati per l'applicazione di modelli nella gestione delle acque degli insediamenti.

Infolge fortschreitender Urbanisierung muss unter anderem auch die Wasserinfrastruktur wachsenden Anforderungen genügen. Neben einer zuverlässigen Wasserversorgung, ist eine weitere wichtige Herausforderung, Regenwasser aus bewohnten Gebieten abzuleiten, um urbane Sturzfluten zu vermeiden. Dazu muss das Abflussverhalten mittels urbanhydrologischer Modelle vorhergesagt werden. Solche Modelle benötigen, neben weiteren Umweltparametern wie z.B. einer adäquaten Niederschlagsverteilung, Versiegelungskarten, d.h. flächendifferenzierte Angaben zum Vermögen von Oberflächen, Wasser aufzunehmen. Unbemannte Flugobjekte (unmanned aerial vehicles UAVs) erfreuen sich zunehmender Beliebtheit als Aufnahmeplattform. Sie finden Anwendung in unterschiedlichen Bereichen wie Photogrammetrie, Archäologie und Landwirtschaft [1][2]. Im Vergleich zu den herkömmlichen Satelliten- oder Luftbildern ist die Aufnahme mit UAVs flexibler und für kleine Flächen und/oder hohen Auflösungen auch effizienter und billiger [3]. Jedoch ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, speziell in urbanen Gebieten: einerseits müssen aufgrund von Gewicht und Kosten Kameras benutzt werden, deren radiometrische Qualität nicht mit professionellen Fernerkundungssensoren vergleichbar ist. Andererseits erreichen tief fliegende UAVs sehr hohe Auflösungen, wodurch kleine Objekte sowie Texturdetails von grösseren Objekten sichtbar werden. Daher sind für die Klassifizierung Messwerte aus einer grösseren Nachbarschaft zu berücksichtigen, um den Kontext zu erfassen. Hier benutzen wir eine randomisierte Textur-Filterbank, die auf rechnerisch effiziente Weise Spektral- und Höheninformationen in einem grossen Massstabsbereich erfasst [4].

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Machbarkeitsstudie, die gemeinsam von den Gruppen Photogrammetrie und Fer-

nerkundung (ETH Zürich) und Siedlungswasserwirtschaft (ETH Zürich/Eawag) durchgeführt wurde. Die Studie untersucht das Potenzial einfacher, ziviler UAVs als Datenlieferant für die Modellierung des Regenwasserabflusses in urbanen Gebieten. Insbesondere interessieren uns drei Aspekte:

- Wir untersuchen, ob eine vergleichsweise kostengünstige Beobachtung der Bodenbedeckung mittels UAV geeignet ist, um das Abflussverhalten im Stadtgebiet zu modellieren.
- Wir testen ein modernes Klassifizierungsverfahren auf Basis des boosting-Algorithmus und effizienter Multiskalen-Merkmale («RQE features»), um Versiegelungskarten aus hochauflösenden Bildern abzuleiten. Als Vergleich dient die im Siedlungswasserbau verbreitete Klassifizierung mit dem pixelweisen maximum-likelihood Verfahren.
- Wir benutzen die so erzeugten Flächenversiegelungskarten als Eingabe für ein hydraulisches Modell, um zu überprüfen, welchen Einfluss verschiedene Datenquellen und Bildverarbeitungsmethoden auf die Vorhersage von Oberflächenabfluss und Kanaldurchfluss haben. Als Referenz gelten dabei punktweise insitu Messungen.

## Versiegelungsgrad

Undurchlässige Flächen im urbanen Raum verhindern das Versickern von Regenwasser in den anstehenden Boden. Dies korreliert stark mit dem Grad der Urbanisierung [5], weil in städtischen Umgebungen versiegelte Oberflächen dominieren (z.B. Dächer und Strassen). Ein erhöhter Anteil von versiegelten Flächen beeinflusst den urbanen Wasserhaushalt, in dem das Volumen des Oberflächenabflusses und die Abflussspitzen erhöht und die Bildung von Bodenfeuchte und die Grundwasserbildung verringert wird. Darüber hinaus erhöhen Spitzenabflussmengen, in Verbindung mit der begrenzten Kapazität eines Entwässerungsnetzes, nicht nur das Überflutungsrisiko, sondern verstärken auch die

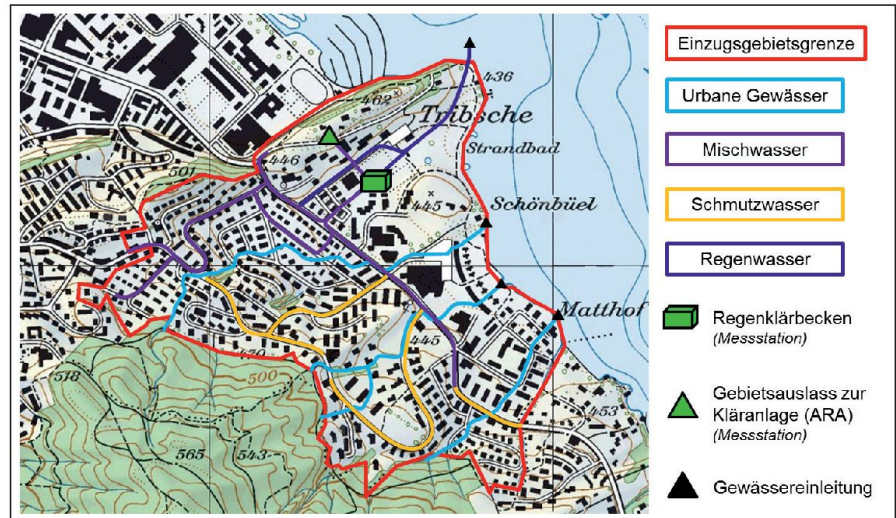


Abb. 1: Einzugsgebiet «Wartegg» in Luzern.

Erosion und die Ablagerung von Sedimenten in Flussbetten. Ein hoher Versiegelungsgrad kann weiters auch einen negativen Einfluss auf die Gewässerqualität haben, da Schadstoffe verstärkt in die Gewässer ausgespült werden.

## Fallstudie und benutzte Bilddaten

Für unsere Fallstudie benutzen wir das Einzugsgebiet «Wartegg», ein Wohngebiet in der Stadt Luzern (siehe Abb. 1). Das Einzugsgebiet erstreckt sich über ca. 77 ha und beherbergt 6900 Einwohner. Es ist repräsentativ für viele Vorstadtgebiete in der Schweiz: hohe bis mässige Besiedlungsdichte, lockere ein- bis zweistöckige Wohnbebauung in hügeliger Topographie, darunter die zu erwartende öffentliche Infrastruktur wie Einkaufszentren und Sportplätze. Regen- und Abwasser werden durch getrennte und Mischwasserkanäle (siehe Abb. 1) mit einer Gesamtlänge von 11,2 km abgeleitet.

## Bilddatensätze

Der erste Satz von Bildern wurde von swisstopo im Juni 2013 aufgenommen. Er ist ein Teil eines Orthophotomosaiks (RGB-Kanäle) mit einer Bodenauflösung von 0,25 m (reduziert von ursprünglich 0,0625 m) und ist bei belaubter Vegetation aufgenommen. In diesem Zusam-

menhang sei darauf hingewiesen, dass swisstopo Bilder höchstens einmal im Jahr, in der Regel aber nur alle drei Jahre, aufnimmt, in den meisten Fällen abwechselnd zwischen belaubter und unbelaubter Vegetation. In der Praxis kann es daher sein, dass für ein bestimmtes Projektgebiet keine aktuellen Bilder zur Verfügung stehen.

Der zweite Datensatz wurde von einem UAV (siehe unten) aus mit einer Canon IXUS 127 HS Digitalkamera mit 16 Mpix-Sensor aufgenommen. Der Flug wurde vor Beginn der Belaubung im März 2014 durchgeführt. Es wurden ebenfalls Orthophotos (RGB-Kanäle, 0,10 m GSD) erzeugt und auf 0,25 m Auflösung reduziert. Der Hauptvorteil von UAVs im Vergleich zum bemannten Flugzeug mit grossformatigen Mapping-Kameras liegt in ihrer Flexibilität: sie können fast jederzeit und an den meisten Orten eingesetzt werden, und die Einsatzkosten sind für kleine Flächen gering.

## Höhendatensätze

Um die in den Bildblöcken enthaltene 3D-Information auszunutzen, verwenden wir bei der Klassifizierung der Versiegelungsflächen auch die Höheninformation. Für den swisstopo Datensatz verzichten wir auf die Neuerstellung des DHM und verwenden stattdessen das swissALTI3D Produkt.

Aus den UAV Bilder wurde mittels dense matching ein aktuelles Höhenmodell erzeugt. Das so erhaltene DSM wurde durch Subtraktion des swisstopo DTM auf ein normalisiertes Oberflächenmodell (nDSM) reduziert. Dieses nDSM wurde nur für die Klassifizierung genutzt, zur hydrologischen Modellierung wird immer das Oberflächenmodell von swisstopo verwendet, um nicht die Einflüsse von Versiegelungskarten und Höhenmodell zu vermischen. Der Einfluss verschiedener Höhenmodelle könnte Thema einer weiteren Untersuchung sein.

## UAV-Plattform

Wir benutzen für unsere Studie einen autonomen Flächenflüger der Firma sensefly SA ([www.sensefly.com](http://www.sensefly.com)). Tabelle 1 enthält detaillierte Information zur Plattform. Beim benutzten Bildsensor handelt es sich um eine angepasste Version der

Canon IXUS 127 HS Kompaktkamera. Tabelle 2 zeigt die Spezifikationen.

## Ergebnisse

### Klassifizierung der Versiegelungsflächen

Tabelle 3 zeigt die über alle Pixel gemessene Gesamtgenauigkeit der Klassifikation mit (i) zwei verschiedenen Datensätzen, und (ii) zwei verschiedenen Klassifikationsverfahren.

|          | UAV  | Swisstopo |
|----------|------|-----------|
| ML       | 78,4 | 80,8      |
| Boosting | 95,2 | 96,3      |

Tab. 3: Gesamtgenauigkeit der Klassifikation (in %).

Die Wahl der Bildmerkmale und des Klassifikators hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses.

Während boosting+RQE eine Genauigkeit von 95,2 % für den UAV Datensatz und 96,3 % für den swisstopo Datensatz erreicht, sind die Ergebnisse beim maximum-likelihood Klassifizierung basierend nur auf Einzelpixeln im Durchschnitt um 16 % schlechter.

## Oberflächenabfluss

Wir verwendeten Boxplots und Streudiagramme, um die Wirkung von allen vier Kombinationen (Datenquelle x Klassifizierungsverfahren) zu untersuchen hinsichtlich (i) Versiegelung und Oberflächenabfluss, (ii) Spitzenabfluss und (iii) Abflussmengen (siehe Abb. 4).

Die gravierenden Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Klassifizierungsmethoden/Bilddaten (siehe Abb. 2) werden durch eine Kalibrierung des Oberflächenabflussmodells weitgehend kompensiert (siehe Abb. 4). Wir beobachten weiterhin, dass infolge des vereinfachten Ansatzes zur Beschreibung des Oberflächenabflusses im Modell EPASWMM (Landnutzungsdifferenzierung ausschliesslich in versiegelte und unversiegelte Fläche) bereits vor der Kalibrierung eine Angleichung der simulierten Abflüsse auftritt. Das Modell vereinfacht stark und aggregiert Pixel innerhalb jedes Teileinzugsgebiets (subcatchment), wodurch lokale Abweichungen der Eingangsdaten geglättet werden. Diese Tendenz wäre bei stärkerer räumlicher Aggregation noch ausgeprägter, z.B. bei der Modellierung grösserer Stadtgebiete, wo die Teileinzugsgebiete, für die eine Referenzabflussmessung vorliegt, typischerweise grösser sind. Die räumliche Auflösung und der Detailgrad hydrologischer Modelle (gekoppelte 1D/2D-Modelle) verbessern sich fortlaufend, und wir erwarten, dass die Qualität der Versiegelungskarten zukünftig einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Ergebnisse haben wird.

## Entwässerungsabfluss

Die Auswertung des Entwässerungsabflusses wurde in zwei Schritten durchge-

|                                  |                                                               |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Gewicht (inkl. camera)           | ca. 0,69 kg                                                   |
| Spannweite                       | 96 cm                                                         |
| Material                         | EPP-Schaum, Kohlenstoffstruktur und Verbundteile              |
| Antrieb                          | Elektrische Druckpropeller, 160 bürstenloser Gleichstrommotor |
| Batterie                         | 11,1 V, 2150 mAh                                              |
| Kamera (standard)                | 16 MP IXUS/ELPH                                               |
| Kamera (optional)                | S110 RGB, thermoMAP                                           |
| Max. Flugzeit                    | 50 Min                                                        |
| Nominale Geschwindigkeit         | 40 – 90 kmh                                                   |
| Windwiderstand                   | Bis zu 45 kmh (12m/s)                                         |
| Radiolink Reichweite             | Bis zu 3 km                                                   |
| Max. Aufnahmegebiet (Einzelflug) | Bis zu 12 km <sup>2</sup>                                     |
| Preis                            | Ca. 20 000 CHF (Drohne + Software)                            |

Tab. 1: Technische Daten des UAVs, verwendet in der Studie (Quelle: [www.sensefly.com](http://www.sensefly.com)).

|                 |                                                                                |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Effektive Pixel | ca. 16,1 Million                                                               |
| Brennweite      | 4,3 mm                                                                         |
| Interfaces      | Hi-speed USB, HDMI Output, Analog audio output, Analog video output (NTSC/PAL) |
| Grösse          | 93,2 x 57,0 x 20,0 mm                                                          |
| Gewicht         | Ca. 135 g (inkl. Akku und Speicherkarte)                                       |

Tab. 2: Technische Daten der Canon IXUS 127 HS Kamera.

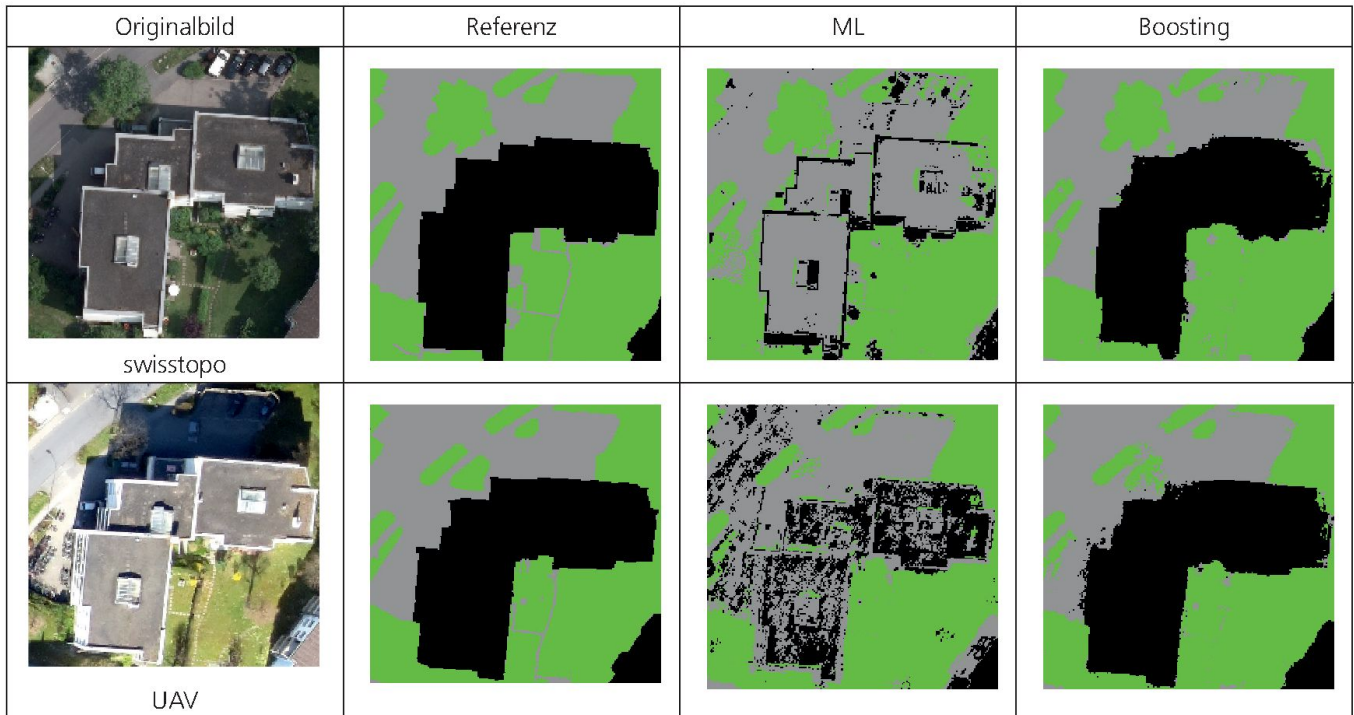


Abb. 2: Bildausschnitte (UAV / swisstopo): Originalbild, manuell ermittelte Referenz, und Klassifikationsergebnisse mit ML und boosting+RQE. Dächer sind schwarz, Strasse/Trottoir sind grau, die Vegetation ist grün.

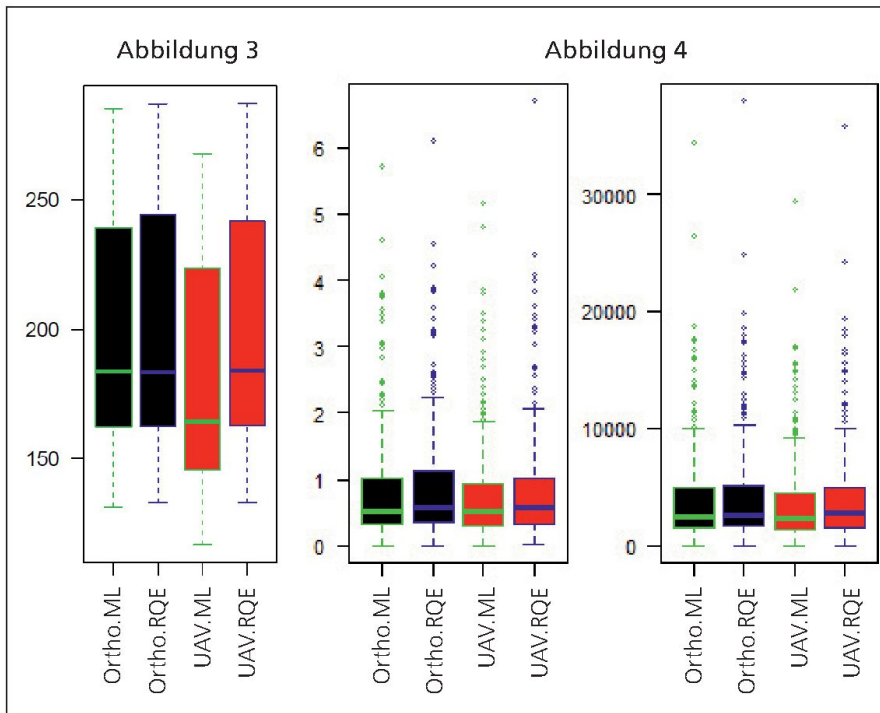


Abb. 3: Bewertung der Spitzenabflüsse am Gebietsauslass für die 13 intensiven Regenereignisse (in [Ls-1], vor der Kalibrierung).

Abb. 4: Oberflächenabfluss für Einzelflächen (links: Spitzenabfluss [Ls-1]; rechts: Abflussvolumen [m³]) für verschiedene Kombinationen aus Datenquelle und Bearbeitungsverfahren. Schwarz = swisstopo, Rot = UAV, Grün = ML, Blau = boosting+RQE.

führt: (1) Vergleich verschiedener Varianten des unkalibrierten Modells und (2) Vergleich des kalibrierten Modells mit insitu Referenzmessungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die vier Modellvarianten in unkalibrierem Zustand voneinander unterscheiden, vor allem in Bezug auf den Spitzenabfluss (siehe Abb. 3). Dies stimmt mit der Analyse des Oberflächenabflusses überein, wo der niedrigste Grad der Versiegelung die niedrigsten Abflussspitzen produziert (Variante UAV ML).

Die Ergebnisse der kalibrierten Modelle (siehe Abb. 5) zeigen, dass eine Kalibrierung mit insitu Punktmessungen, wie erwartet, zu verbesserten Vorhersagen führt. Interessanterweise gelingt es durch die Kalibrierung, die Unterschiede zwischen den vier Modellvarianten fast vollständig zu kompensieren. Es scheint, dass einfache Abflussmodelle bei der gewählten räumlichen Auflösung stabile relative Ergebnisse produzieren. Die Kalibrierung bezüglich einer kleinen Anzahl von insitu Messungen kann mit vier Kalibrierungsparametern erreicht werden: maximale Versickerungsrate, Rückgangskonstante

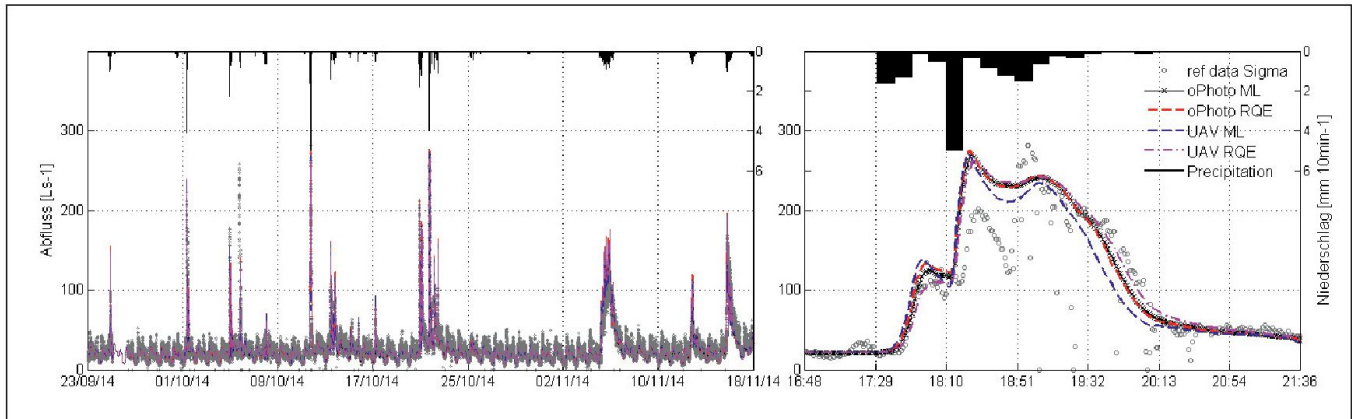


Abb. 5: gemessene Referenz (graue Punkte) und Simulationen (Linien) für den Validierungszeitraum von September bis November 2014 (links) und ein ausgewähltes Regenereignis am 11. Oktober 2014 (rechts).

der Versickerungsrate nach HORTON, Trocknungszeit und Grösse des Einzugsgebiets für die Zwischenabflusskomponente.

## Zusammenfassung

Der erste Teil der Studie zeigt, dass Bilder von Amateur-Digitalkameras an Bord von UAVs für die Klassifizierung der versiegelten Flächen genauso gut geeignet sind, wie professionell akquirierte Luftbilder. Darüber hinaus erzielt (mit beiden Datenquellen) die Kombination boosting+RQE, die Werte aus einer grösseren Pixelnachbarschaft mitbenutzt, wesentlich bessere Ergebnisse als die weit verbreitete pixelweise maximum-likelihood Klassifizierung.

Im zweiten Teil der Studie wurde untersucht, wie die beobachteten Unterschiede in den Versiegelungskarten sich durch ein typisches Modell der Siedlungswasserwirtschaft fortpflanzen. Die Prognosen der unkalibrierten Modellierung zeigen deutliche Unterschiede (vor allem bei den Spitzenabflüssen). Es ist in diesem Zusammenhang festzuhalten, dass unkalibrierte Vorhersagen im Allgemeinen eher ungenau sind. Nach der Kalibrierung sind die Vorhersagen mit unterschiedlichen Eingangsdaten sehr ähnlich, zumindest für die konzeptionell vereinfachten Oberflächenabflussmodelle, die den Versiegelungsgrad über grosse räumliche Bereiche aggregieren. Diese momentan gebräuchlichen Modelle scheinen relativ

unempfindlich gegen die Variationen bei der Versiegelung zu sein. Angesichts des nichtlinearen Charakters hydrologischer Prozesse erwarten wir, dass sich dies mit hochauflösenden 2D-Modellen (2D-Flachwassergleichungen) ändern wird. Insgesamt stellt die Bilddatenakquise mittels UAVs und Kompaktkameras eine praktikable Alternative dar, um Basisdaten für Modelle in der Siedlungshydrologie zu erheben, v.a. auf für kleine bis mittelgrosse Einzugsgebiete (Stadtteilebene). UAVs geben dem Benutzer die Möglichkeit, jederzeit aktuelle Luftbilder (und Höhenmodelle) zu einem vergleichsweise niedrigen Preis aufzunehmen, ohne Abstriche bei der Qualität der Bilddaten zu machen.

## Referenzen:

- [1] Sauerbier, M. and Eisenbeiss, H.: UAVs for the documentation of archaeological excavations, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 526–531, 2010.
- [2] Zhang, C. and Kovacs, J.: The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review, *Precision Agriculture*, 13, 693–712, 2012.
- [3] Eisenbeiss, H.: UAV photogrammetry, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
- [4] Tokarczyk, P., Wegner, J., Walk, S., and Schindler, K.: Features, Color Spaces, and Boosting: New Insights on Semantic Classification of Remote Sensing Images, *IEEE Tran-*

sactions on Geoscience and Remote Sensing, 53, 280–295, 2015.

[5] Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., and Briggs, J. M. (2008). «Global change and the ecology of cities.» *Science*, 319(5864), 756–760.

Piotr Tokarczyk  
Konrad Schindler  
Institut für Geodäsie und  
Photogrammetrie  
ETH Zürich  
Stefano-Franscini-Platz 5  
CH-8093 Zürich  
piotr.tokarczyk@geod.baug.ethz.ch

Frank Blumensaat  
Joao Paulo Leitao  
Jörg Rieckermann  
Eidgenössische Anstalt für Wasser-  
versorgung, Abwasserreinigung &  
Gewässerschutz (Eawag)  
Überlandstrasse 133  
CH-8600 Dübendorf

Frank Blumensaat  
Institut für Umweltingenieurwissen-  
schaften  
ETH Zürich  
Stefano-Franscini-Platz 5  
CH-8093 Zürich