

Einsatz von UAV im alpinen Gelände.

Erfahrungsbericht und Anwendungsbeispiel aus der Naturgefahrenpraxis



Bernadette Sotier, Armin Graf, Johannes Kammerlander, Innsbruck

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Unbemannte Flugsysteme (UAV) werden immer mehr zum Standardwerkzeug zur Erfassung von Geodaten, insbesondere der Gewinnung von Luftbildern. Mit der entsprechenden Software können daraus verhältnismäßig rasch dreidimensionale Modelle der Geländeoberfläche berechnet werden. Im Naturgefahrenbereich sind solche aktuellen und hoch aufgelösten Oberflächenmodelle als Datengrundlagen für die weitergehende Analyse und das Prozessverständnis von Ereignissen gefragt. Vor diesem Hintergrund wurde im Sommer im Tiroler Halltal (Karwendel) die Befliegung einer Erosionsrinne mit einer ausgedehnten Schutthalde durchgeführt. Der folgende Beitrag geht im ersten Teil auf die besonderen Herausforderungen ein, welche die extreme alpine Topographie sowohl an die Durchführung des Fluges als auch an die anschließende Auswertung der Bilder stellt. Im zweiten Teil wird als konkretes Anwendungsbeispiel dieser neuen Geländedaten die Ereignisrekonstruktion zweier Murgänge beschrieben und der Mehrwert von Geländedaten aus UAV-Luftbildern diskutiert.

Schlüsselwörter: UAV, alpine Naturgefahren, Dokumentation, Ereignisrekonstruktion

Abstract

UAVs become a standard-method for geodata collection, particularly high-resolution aerial images. With easy to use image matching software nowadays it is possible to calculate 3D models of the surface fast and cost-effective. Such actual models often are asked for natural hazard management. For the purpose of calculating a mass balance of a debris flow in the Tyrolean Halltal a UAV was used. The extreme alpine environment was challenging for both the mission and the evaluation of the aerial images. With this data, a chronologically resolved back-calculation of one debris-flow event could be performed.

Keywords: UAV, alpine natural hazards, debris-flow event

1. Einleitung

Die Wechselreisse (Halltal, Tirol) ist eine ausgedehnte Schutthalde, welche von einer mächtigen Murrinne linear durchzogen wird. Diese beginnt in einer Seehöhe von 1438m am Fuß einer ausgeprägten Felsrinne und mündet 480 Höhenmeter tiefer in den Salzbergbach. Nach oben hin schließt das Bettelwurfkar an, ein verzweigtes Sammelgebiet zwischen den Gipfeln Bettelwurf (2726m Seehöhe) und Wechselspitze (2324m Seehöhe). Es entwässert ein oberflächliches Einzugsgebiet von 38,6ha (Abbildung 1).

In den Jahren 2010 und 2011 ereigneten sich zwei größere Murereignisse, welche erhebliche Schuttmengen aus der Reisse erodierten und eine mächtige Erosionsrinne formten. Die Straße ins Halltal, die den Salzbergbach in diesem Abschnitt rechtsufrig begleitet, wurde dabei verschüttet und teilweise zerstört [1]. Im Auftrag des

Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV), Gebietsbauleitung Mittleres Inntal, wurde Ende September 2012 eine Luftbildbefliegung der Wechselreisse durchgeführt. Diese Befliegung hatte primär zum Ziel (i) aus den Luftbildern ein aktuelles und möglichst genaues Oberflächenmodell der Erosionsrinne zu berechnen (ii) aus der Differenz zum vorhandenen Lasergeländemodell (Stand 2009) Erosions- und Ablagerungsbereiche zu identifizieren, sowie die verlagerten Schuttmassen zu quantifizieren und (iii) mittels dieser neuen Informationen die Ereignisrekonstruktion zu verifizieren und zu ergänzen.

2. Datenerfassung und Auswertung

2.1 Befliegung

Die Aufnahme der Luftbilder wurde mit Hilfe eines UAV durchgeführt (siehe Abbildung 2).

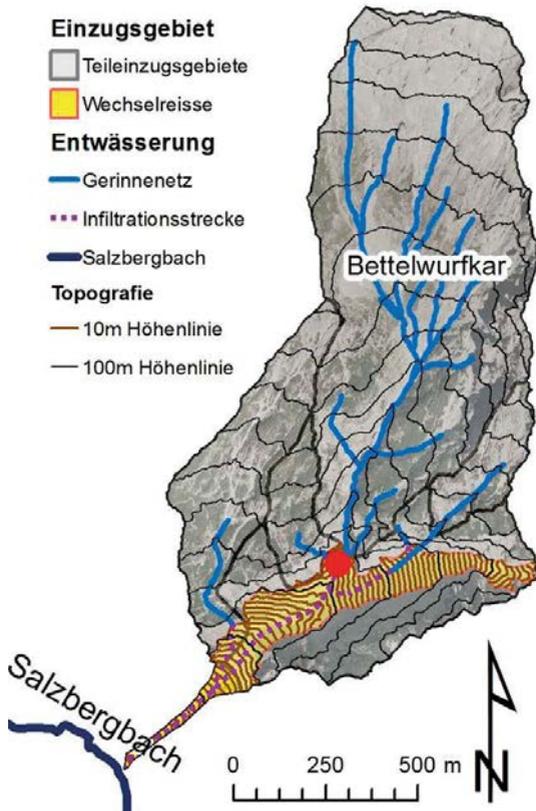


Abb. 1: Einzugsgebiet der Wechselreisse (links); Wurzel der Murgangrinne (rechts); Aufnahmestandort des Fotos ist als roter Punkt im linken Bild dargestellt – Blickrichtung Nord)

Zum Einsatz kam ein motorisiertes Segelflugmodell mit einer Spannweite von 2 Metern, das für die Verwendung als kameratragende Plattform umgebaut wurde. Der Motor wurde mit Lithium-Polymer-Akkus betrieben, ein Akku reicht für eine Flugzeit von ca. 30 Minuten. Als Sensor wurde eine Sony NEX 5N mit einer Festbrennweite von 16 mm verwendet. Das UAV wurde zusätzlich mit einem Autopiloten – einer Kombination aus Lagesensoren (IMU) und einem GPS-Empfänger – ausgestattet, so dass es im autonomen Modus betrieben werden kann. Als Hardware kam ArduPilot Mega in der Version 1.0 zum Einsatz, dessen Programmierung im Rahmen eines Open-Source-Projektes stattfindet [2, 3]. Mit Hilfe dieses Autopiloten ist es unter optimalen Voraussetzungen möglich, einen Flugpfad vorzugeben, um die erforderliche Bildüberlappung für die photogrammetrische Auswertung zu garantieren. Die besonderen Gegebenheiten der Wechselreisse stellten die Flugplanung und Durchführung der Befliegung jedoch vor einige Schwierigkeiten und es mussten speziell für die weitere Prozessierung der Luftbilder teilweise

erhebliche Einschränkungen in Kauf genommen werden:

- Die Höhererstreckung ist mit 480 Höhenmetern auf eine horizontale Distanz von ca. 900 Metern sehr groß, zusätzlich biegt die Rinne im oberen Teil gegen Norden ab. Dies führt dazu, dass das UAV sehr schnell aus dem kontrollierbaren Blickfeld verschwindet. Daher musste die Befliegung in zwei Etappen von verschiedenen Standpunkten aus durchgeführt werden (Abbildung 3 links). In der Rinne selbst sind keine geeigneten Landeplätze vorhanden, der Untergrund besteht aus Schutt oder ist mit Latschen bestockt. Die Landungen führten zu Beschädigungen an Rumpf und Leitwerken, die jedoch vor Ort repariert werden konnten.
- Die möglichen Standplätze für den Piloten liegen im zentralen und oberen Bereich der Wechselreisse. Dort hat man bereits eine sehr eingeschränkte Himmelssicht und zu wenige Satelliten, um ein zuverlässiges GPS-Signal empfangen zu können. Aus diesem Grund konnte das Fluggerät i) nicht im autonomen



Abb. 2: Start des UAV im Testgebiet

Modus betrieben werden und ii) kein Flugpfad vorgegeben werden. Das UAV musste daher manuell gesteuert werden, der nachträglich rekonstruierte Flugpfad (Abbildung 3 rechts) zeigt die daraus resultierenden Bereiche mit schlechter Bildüberlappung vor allem am oberen und unteren Ende der Rinne.

- Ein echter Überflug über die tief eingeschnittene Rinne mit dem Ziel, ein GPS-Signal zu empfangen, hätte eine Flughöhe von ca. 500 Metern über dem Standpunkt des Piloten bedeutet. Dies wäre jedoch aus Sichtbarkeitsgründen nicht machbar, da auf diese Distanz die Fluglage des UAV kaum mehr beurteilt werden kann und somit im Bedarfsfall ein manuelles Eingreifen nicht mehr möglich ist; ein alternativer Pilotenstandpunkt oberhalb der Rinne kam nicht in Frage, da das Gelände entweder nicht zugänglich ist oder keine Landemöglichkeit besteht.
- Die schluchtartige Verengung im oberen Teil der Wechselreisse – stellenweise ist die Schlucht nur zwischen 50 und 80 Meter breit – ist für Wendemanöver besonders kritisch, da die Distanz zu den begrenzenden Felswänden aus der Pilotensicht kaum abzuschätzen ist. Aus diesem Grund konnte nicht bis in den hintersten Winkel der Rinne geflogen werden. Daher sind die Bilder in diesem Bereich aus einem sehr ungünstigen, flachen Winkel (aus der Kurvenlage heraus) aufgenommen.
- Die schlechte Satellitenverfügbarkeit erschwerte zusätzlich die Erhebung von Passpunkten für die nachträgliche Georeferenzierung des Oberflächenmodells.
- Aufgrund der zu erwartenden starken Thermik über den Latschenfeldern war es erforderlich, die Befliegung möglichst bis Mittag abzuschließen. Dies hatte zur Folge, dass die oberen Abschnitte der Rinne noch im Schatten lagen,

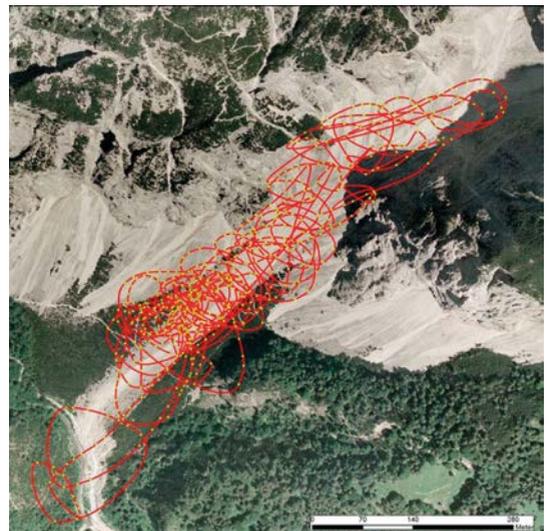
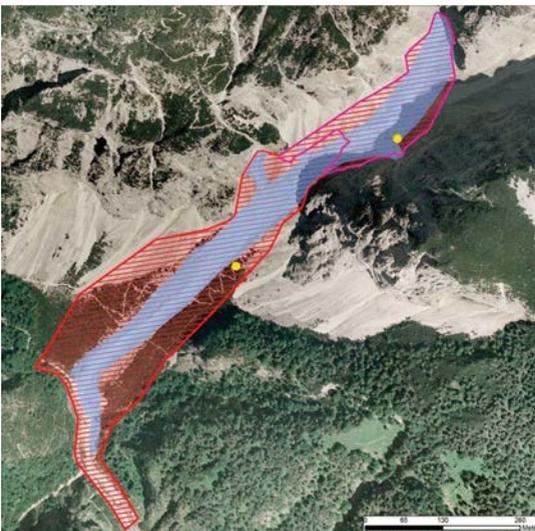


Abb. 3: Pilotenstandpunkte (gelb), oberer und unterer Teilbereich für die Berechnung des DSM (schraffiert) und Abgrenzung zur Berechnung des Differenzmodells (blau). Rechts der aus den Bildern rekonstruierte Flugpfad.



Abb. 4: Auf der Suche nach den Passpunkten; im UAV-Luftbild (links) und im 2009er Orthofoto (rechts)

was die photogrammetrische Auswertung entsprechend erschwerte.

- Eine vollständige und systematische Abdeckung des Gebietes konnte mit der Befliegung unter den gegebenen Umständen nicht erreicht werden; vielmehr handelt es sich um eine unsystematische Ansammlung von Bildern mit stark variierender Bodenauflösung, randlich schlechter Bildüberlappung, darunter sehr viele Schrägaufnahmen mit großen Höhendifferenzen in einem Bild.

2.2 Photogrammetrische Auswertung

Für die Orientierung der Luftbilder sowie die Berechnung des 3D-Modells stand das Programmpaket PhotoScan Professional (Agisoft, www.agisoft.ru, [5]) zur Verfügung. Von den 1140 Bildern wurden 625 ganz oder teilweise verwendet. Da in diesem Gelände die in einem Foto abgebildeten Höhendifferenzen häufig um ein Vielfaches größer als die Flughöhe über dem höchsten Geländepunkt sind, kommen unweigerlich starke Verzerrungen zustande. Dies führt dazu, dass die für die Orientierung notwendigen Verknüpfungspunkte für viele Bilder nicht automatisch gefunden werden können. Für die Auswertung bedeutete dies einen erhebli-

chen manuellen Nachbearbeitungsaufwand. Die abgedeckte Fläche von 11,3 ha und die damit verbundene große Datenmenge von mehr als 600 Bildern hatte zudem sehr lange Rechenzeiten zur Folge.

Da bei der Befliegung aufgrund der starken Abschattungen kein GPS-Signal aufgezeichnet werden konnte, erfolgte die Verortung der Luftbilder im Postprocessing über Passpunkte, die aus dem aktuellen Orthofoto und dem Laser-DGM (beides Stand 2009) bestimmt wurden. Zur Definition des Raumbezugs wurden in den Bildern 37 Passpunkte verortet. Die Lage der Passpunkte ist aber aufgrund der mäßigen Auflösung des Orthofotos nur mit einer mittleren Genauigkeit von ca. 0,5 – 1 Meter (im Schatten deutlich schlechter!) bestimmbar, siehe hierzu auch Abbildung 4. Die X- und Y-Koordinaten wurden, wenn möglich an klar identifizierbaren Strukturen in den vom Murgang nicht veränderten Randbereichen abgegriffen, z. B. an Felswänden (Übergang Fels-Schutt), an großen Steinen oder entlang der Wege. Die Höhenwerte stammen aus dem Laser-DGM. Die Lagegenauigkeit des Laser-DGM wird mit $\pm 0,3\text{m}$, die Höhengenaueigkeit mit $\pm 0,15\text{m}$ angegeben [4]. Besonders im zentralen Bereich der Rinne konnten auf dem

Orthofoto keine Passpunkte identifiziert werden, da sie entweder nicht auffindbar (wegen Auflö- sung, Beleuchtung, Schatten, Schneefeld) oder aufgrund der Erosion infolge der Murgänge gar nicht mehr vorhanden waren.

Die Berechnung des Modells erfolgte mittels Bild-Matching getrennt für den oberen und den unteren Teil der Rinne (Abbildung 3 links). Dadurch konnte einerseits die Genauigkeit des Modells verbessert und andererseits die Re- chenzeiten erheblich verkürzt werden.

2.3 Ergebnisse

Für die georeferenzierte 3D-Punktwolke wurde ein aus allen X, Y und Z-Werten gemittelter Ko- ordinatenfehler von 0,95 m für den unteren Teil und 1,77 m für den oberen Teil ausgegeben. Aus der Punktwolke wurde das Oberflächenmodell (DSM) berechnet und anschließend als Raster mit einer Auflösung von 15 cm exportiert. In dieser Auflösung sind Detailstrukturen bis hin zu einzelnen Steinen und Latschen gut erkennbar (Abbildung 5). Für die weiteren Berechnungen wurde das DSM auf eine Rasterweite von 0,5 m aggregiert.

Die Lage- und Höhengenaugigkeit des be- rechneten DSM ist aufgrund fehlender exakt

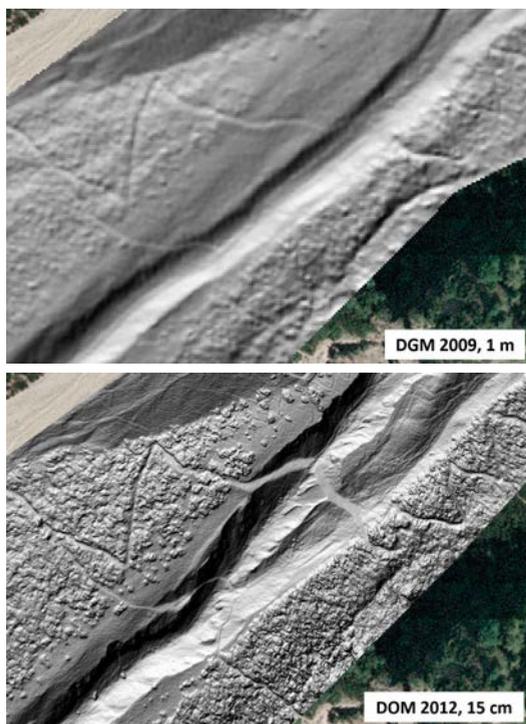


Abb. 5: Vergleich Laser-DGM 2009 (oben) und Luftbild- DSM (unten)

eingemessener Passpunkte nur grob abschätz- bar und zudem von der Identifizierbarkeit der Passpunkte aus dem vorhandenen Orthofoto abhängig. In den nicht vom Murreignis betrof- fenen stabilen Bereichen liegt das Luftbild-DSM im Mittel $-0,5\text{ m} \pm 0,7\text{ m}$ über dem Laser-DGM. Besonders im unteren, latschenbestandenen Teil des Modells resultieren die Höhenunterschiede aus der Vegetation (Differenz aus Geländemo- dell und Oberflächenmodell). Größere Fehler können auch im oberen Teil der Rinne und zu den Rändern hin festgestellt werden. Dort sind vermutlich die deutlich geringere Bildüberlap- pung, Verzerrungen und tiefe Schatten in den Luftbildern, sowie schlecht sichtbare Passpunkte als Ursache anzunehmen.

3. Anwendungsbeispiel – Ereignisrekonstruktion

3.1 Allgemeines

Murgänge vermögen große Massen an Sedi- menten binnen kurzer Zeit entlang ihrer Fließstrecke zu erodieren und umzulagern. Während sich die Entstehung von Murgängen zumeist auf intensi- ven Oberflächenabfluss und/oder Porenwasser- überdruck infolge der Bodenwassersättigung zurückführen lässt, wird die Erosions-/ Umlage- rungsintensität zudem maßgeblich von der Ver- fügbarkeit an Geschiebematerial bestimmt [7].

Die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit von Murgängen sowie deren kurzer Ablaufzeit- raum erschweren eine direkte Beobachtung, respektive die Messung der Prozessdynamik. Somit kommt der Analyse von vergangenen Ereignissen eine hohe Bedeutung zu [8]. Am Beispiel der Wechselreise werden im Folgen- den die Methoden und die Unsicherheiten einer Ereignisrekonstruktion kurz erläutert bzw. der Mehrwert von Geländedaten aus unbemannten Flugsystemen erörtert.

3.2 Sedimentumlagerung – Massenbilanz

Durch den Vergleich zwischen dem Laserge- ländemodell aus dem Jahr 2009 und dem 2012 photogrammetrisch erstellten Oberflächenmodell konnte die Erosions-/ Umlagerungsintensität in dieser alpinen Schutthalde quantifiziert werden. Das Differenzbild zeigt eine lineare Sedimen- tation im Ausmaß von 85361 m^3 , in deren Folge eine markante Tiefenrinne entstanden ist (Abbildung 6).

Die Ereignisdokumentation des Forsttechni- schen Dienst der Wildbach- und Lawinenver- bauung (WLVB) [6] verzeichnet für den Zeitraum 2009 bis 2012 zwei Murgangereignisse, welche

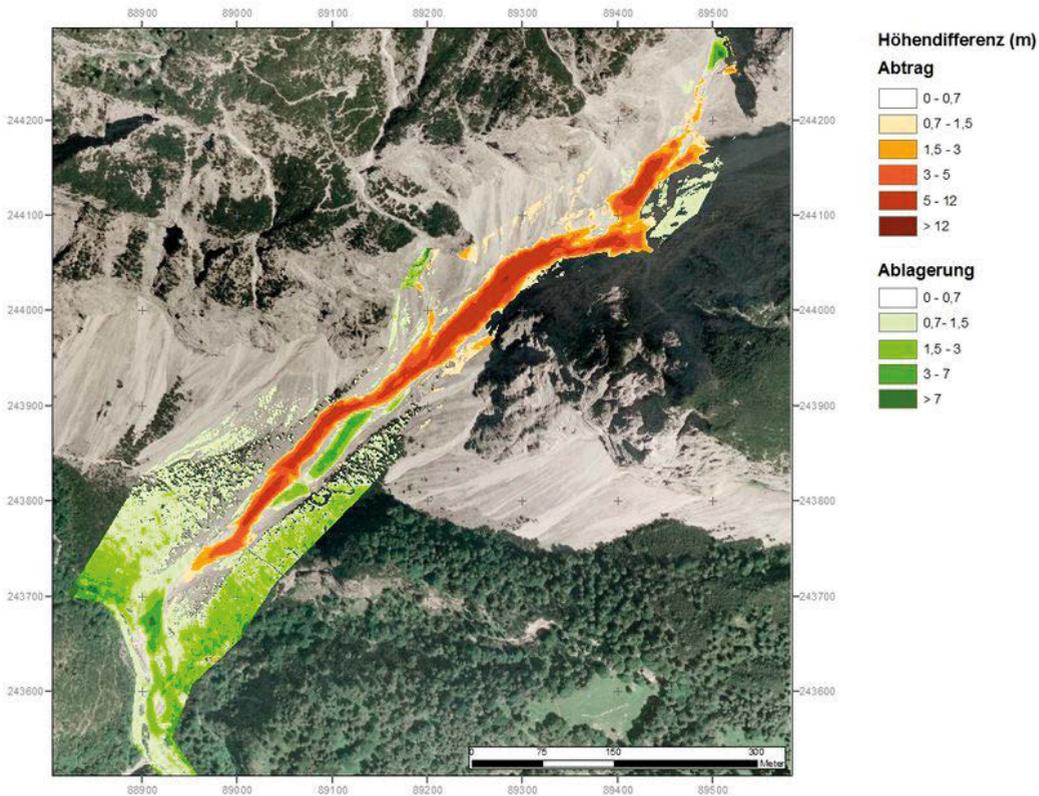


Abb. 6: Höhendifferenzen in Metern zwischen den Jahren 2009 und 2012

jeweils große Mengen an Sedimenten aus der Schutthalde erodierten und in den unterhalb anschließenden Salzbergbach verlagerten.

Der erste und auch maßgebende Murgang ereignete sich am Abend des 17. Juli 2010. Mit Hilfe einer Fotodokumentation, welche unmittelbar nach dem Ereignis aufgenommen wurde, konnte das Erosionsvolumen grob auf 51300 m^3 geschätzt werden. Eine terrestrische Vermessung der Sedimentablagerung am unteren Ende der Schutthalde, ebenfalls kurz nach dem Ereignis durchgeführt, beziffert ein Volumen von 43220 m^3 (Abbildung 10). Die Differenz der beiden Volumina kann dahin gehend interpretiert werden, dass das abgelagerte Murgangmaterial teilweise durch den Salzbergbach remobilisiert und weitertransportiert wurde; Bachbegehungen und Fotos der WLW bestätigen einen intensiven Geschiebeeinwurf in den Salzbergbach.

Das zweite aufgezeichnete Ereignis fand im Jahr 2011 statt und führte zu einem erneuten Sedimentaustrag von 25000 m^3 [6].

Beide Abtragsvolumina aufsummiert ergeben ein Gesamtabtragsvolumen von rund 76300 m^3 . Verglichen mit der Differenz aus Gelände- und Oberflächenmodell, welche einen linearen

Materialaustrag mit 85361 m^3 quantifiziert, zeigt sich eine trotz aller Unsicherheiten gute Übereinstimmung zur Massenbilanz: Die Größenordnung der Sedimentumlagerung aus der Ereignisdokumentation konnte über die Geodatenerfassung mittels UAV sehr gut verifiziert werden.

3.3 Murgangereignis 2010 – Prozessrekonstruktion

Die Entstehung des Murgangs vom 17. Juli 2010 ist auf mehrere, kurz aufeinanderfolgende Starkregenereignisse zurückzuführen (Abbildung 7). Kurze Starkregen führen in kleinen, felsreichen Einzugsgebieten, wie dem Einzugsgebiet der Wechselreisse (Abbildung 1 links) zu einer starken hydrologischen Reaktion in Form rasch ansteigender Abflusswellen [9]. Bedingt durch den großflächig subanstehenden Felsuntergrund und die spärliche Vegetation im Bettelwurfkar ist die Infiltrationsleistung des Bodens stark reduziert. In Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität überwiegen somit oberflächliche Abflussprozesse, welche ein schnelles Abfließen und kurze Konzentrationszeiten kennzeichnen.

Die N/A-Simulation des ersten Starkregenereignisses (am frühen Nachmittag des 17. Juli

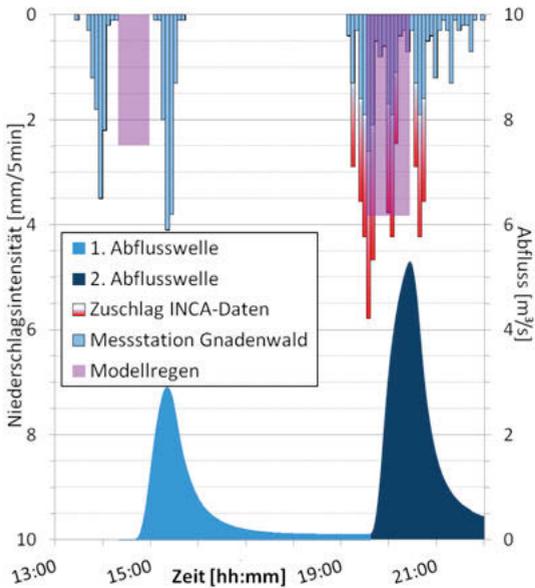


Abb. 7: Niederschlagsdaten und N/A-Modellergebnis der hydrologischen Rückrechnung vom 17. Juli 2010

2010; vgl. Abbildung 7) führt zu einer Abflusswelle von rund 1,5 Stunden Dauer und einem Spitzenabfluss von $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem Bettelwurfkar. Infolge der losen Lagerung des Schutts in der Wechselreisse und der trockenen Witterung der vorgehenden Tage ist bei der ersten Abflusswelle von einer intensiven Versickerung entlang der Wechselreisse auszugehen. Der maßgebende Murgang ereignete sich in den frühen Abendstunden gegen 20.30 Uhr [6] und ist somit auf die zweite Abflusswelle zurück zu führen.

Tognacca [10] stellte über zahlreiche Modellversuche zum Erosionsverhalten von Murgängen in Schuttstrecken fest, dass vor allem bei kurzen Abflusswellen (wie jenem der ersten Abflusswel-

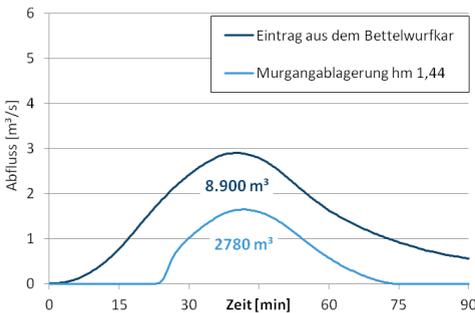
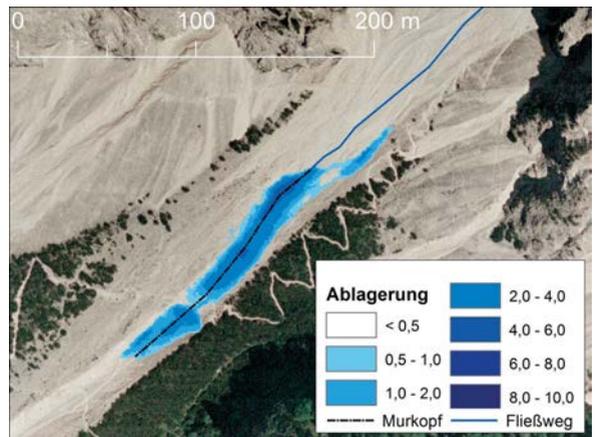


Abb. 8: Abflustranslation der ersten Abflusswelle entlang der Wechselreisse unter Berücksichtigung einer Infiltrationsrate von $0,5 \text{ mm/s}$ (links); Schuttablagerung in der Murgangrinne (rechts)



le) der zunehmende Wasserverlust infolge von Infiltration zu einem frühzeitigen Stillstand des Murgangs, bzw. zur abrupten Schuttablagerung führt. Dieser Effekt wird im Differenzbild der beiden digitalen Oberflächenmodelle (Abbildung 6) ersichtlich: Neben der großen linearen Erosionsrinne ist auch eine geringmächtige Schuttablagerung von 5685 m^3 im unteren Drittel der Wechselreisse entstanden (Abbildung 8 rechts).

Aus dem Berechnungsansatz zur Bestimmung der Transportkapazität von Murgängen nach [10] resultiert für das Wasservolumen der ersten Abflusswelle im Bereich der Schuttablagerung bei hm 1,44 (2780 m^3 ; Abbildung 8 links) ein mobilisiertes Feststoffvolumen von 5163 m^3 . Unter Berücksichtigung der Porosität der Schuttalade mit 24% (vgl. [10]) ergibt sich ein Ablagerungsvolumen von 6793 m^3 , welches im Vergleich zum geodätisch berechneten Volumen von 5685 m^3 wiederum eine allen Unsicherheiten und Annahmen entsprechend gute Übereinstimmung aufweist. Somit kann die Hypothese, dass die erste Abflusswelle zwar ebenfalls zu einer Feststoffumlagerung führte, jedoch zu einem erheblichen Anteil in der Schuttalade infiltrierte mit Hilfe des digitalen Oberflächenmodells ausreichend plausibilisiert werden.

Die erhöhte Disposition infolge der teilweisen Wassersättigung im oberflächennahen Schuttkörper der Wechselreisse und die zweite Abflusswelle als direktes Auslöseereignis führten schließlich zur Entstehung eines großen Murgangs. Die Ausbildung einer mächtigen, linearen Erosionsrinne belegt die intensive Schuttmobilisierung entlang der ganzen Fließstrecke, welche für dieses Ereignis mit 51300 m^3 quantifiziert werden konnte.

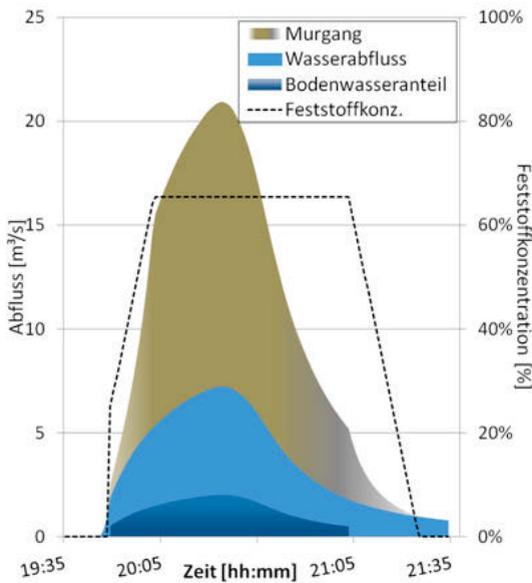


Abb. 9: Murganghydrograph des Ereignisses vom 17. Juli 2010

Die Rekonstruktion des Murganghydrographs basiert wiederum auf der Transportformel nach [10] und berücksichtigt den anfänglich raschen Übergang von intensiven Geschiebetransport

hin zu einer Murgangbewegung über den linearen Anstieg der Feststoffkonzentration; gleiches gilt für das Ende des Murgangs (Abbildung 9). Unter Berücksichtigung des im Zuge der ersten Abflusswelle in den Schuttkörper infiltrierten Bodenwassers und einer Porosität von 24% (vgl. [10]) ergibt sich das Abtragsvolumen mit 51856 m³.

4. Schlussfolgerungen

Wie am Beispiel der Wechselreise im Tiroler Halltal gezeigt werden konnte, liefern die mit Hilfe eines UAV gewonnenen Geländedaten neben der eigentlichen Ereignisdokumentation auch einen ganz wesentlichen Beitrag zu deren nachträglichen Rekonstruktion und können somit zum Prozessverständnis solcher Ereignisse beitragen. Im Vergleich zu anderen Methoden zur Erfassung von Oberflächeninformation wie z. B. terrestrische Photogrammetrie und Airborne Laserscanning sind UAV flexibel, schnell einsetzbar und zudem deutlich kostengünstiger. Unbemannte Luftfahrzeuge können im alpinen Gelände auch dort noch eingesetzt werden, wo selbst terrestrische Vermessung einen großen Aufwand bedeuten würde. Diese Problematik

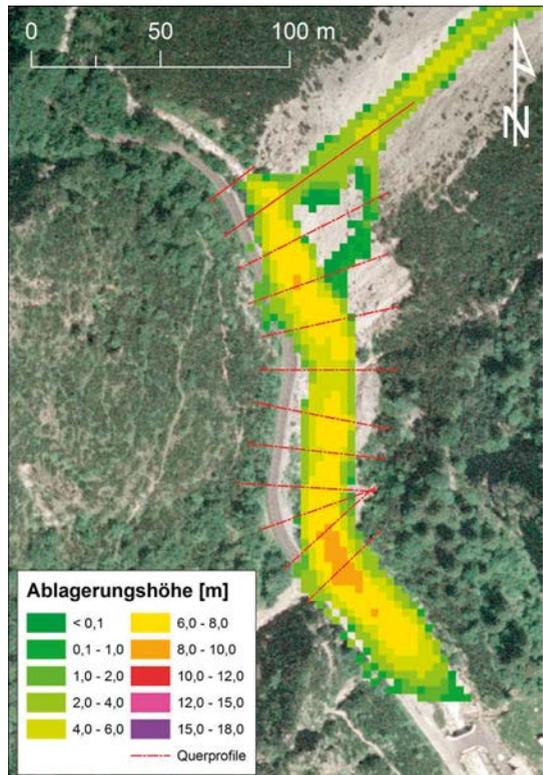
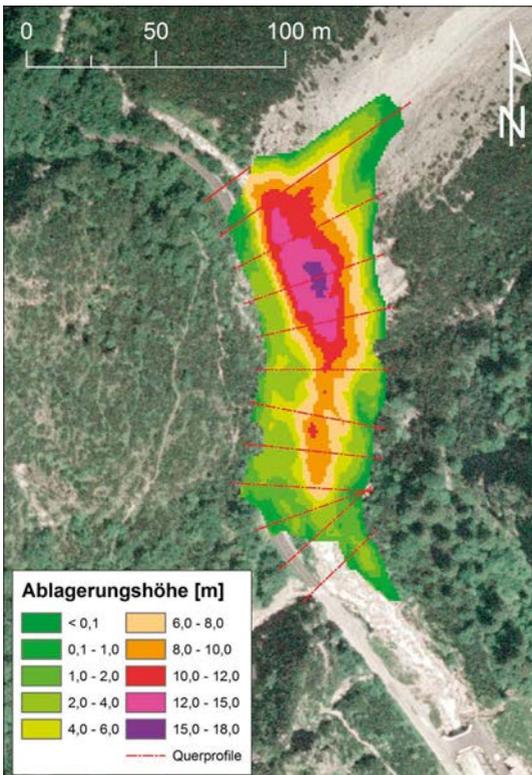


Abb. 10: Gemessene Murgangablagerung des Ereignisses vom 17. Juli 2010 (links); simulierte Ablagerung (rechts)

wurde beispielsweise in [11] beschrieben. Dort wurde mittels terrestrischem Laserscanning ein hochaufgelöstes Geländemodell von angrenzenden Gebieten erstellt, einzelne Teilbereiche konnten jedoch wegen ihrer topografischen Lage nicht erfasst werden. Dies führte dazu, dass die Massenbilanz (Erosion vs. Ablagerung) in [11] nur bedingt erfasst werden konnte. Zusammen mit den aus der Wechselreise gewonnenen Erkenntnissen kann man daraus folgern, dass für Zwecke der Ereignisrekonstruktion und/oder Modellkalibrierung die flächige Abdeckung des gesamten Untersuchungsgebietes entscheidender ist als eine hohe Genauigkeit in Teilbereichen. Desweiteren konnte gezeigt werden, dass auch mit Bildern aus nicht systematisch durchführbaren Befliegungen aufgrund der mittlerweile großen Leistungsfähigkeit von Image-Matching-Verfahren ausreichend gute Ergebnisse erzielt werden können.

Danksagung

Diese Arbeit sowie Bau und Ausstattung des UAV konnte im Rahmen des EU-Projekts NewFOR – NEW technologies for a better mountain FORest timber mobilization (INTERREG Alpine Space) finanziert und durchgeführt werden.

Referenzen

- [1] *Kammerlander, J., Kohl, B. (2011):* Modellierung der Halltalmure. Gutachten im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung BMLFUW
- [2] www.diydrones.com
- [3] <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/>
- [4] GEOLAND.AT Metadatenkatalog (2013): <http://www.geoland.at/geonetwork/srv/de/main.home>
- [5] Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 0.8.4. www.agisoft.ru
- [6] Forsttechnischer Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung (2012): WKL. Digitaler Ereigniskataster. (unveröffentlicht). Ereigniskarte einsehbar unter www.naturgefahren.at

- [7] *Rickenmann, D. (2003):* Methoden zur Beurteilung von Murgängen. In: ETAlp (2003): Agerer, H., Aigner, H., Angerer, H., Anker, F., Bunza, G., Ferlan, E., Gaztermaier, W., Hafner, K., Hehn, F., Honsowitz, H., Hübl, J., Kirnbauer, R., Klaus, W., Kohl, B., Markart, G., Marschallinger, R., Mayer, R., Mayerl, M., Mölz, M., Ofner, G., Pirkl, H., Pittracher, M., Rickenmann, D., Schiegg, H., Schiffer, M., Schmid, F., Schmidt, R., Schnetzer, I., Stepanek, L. ETAlp - Erosion, Transport in Alpenen Systemen - Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. Projektbericht des BMLFUW, Wien.
- [8] *Hübl, J., Kienholz, H. & Loipersberger, A. (2006):* DOMODIS – Dokumentation alpiner Naturereignisse [Documentation of Mountain Disasters]. Abrufbar unter www.boku.ac.at.
- [9] *Dobmann, J. (2009):* Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Interpretations- und Praxishilfe. Inauguraldissertation an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- [10] *Tognacca, C. (1999):* Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.
- [11] *Bremer, M. & Sass, O. (2012):* Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology* 138, S. 49-60.

Anschrift der Autoren

Bernadette Sotier, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Institut für Naturgefahren, Hofburg – Rennweg 1, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: bernadette.sotier@uibk.ac.at

Armin Graf, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Institut für Naturgefahren, Hofburg – Rennweg 1, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: armin.graf@uibk.ac.at

Dipl.-Ing. Johannes Kammerlander, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Wasserbau, Technikerstraße 11, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: johannes.kammerlander@uibk.ac.at