

Effizientes Monitoring alpiner Naturgefahren mit Fotogrammetrie

Felix PIRINGER¹ (<https://orcid.org/0009-0005-3696-0518>)

¹ Grünenfelder und Partner AG, felix.piringer@gruenenfelder.ch (Felix Piringer)

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-018](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-018), CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für Materialien von Dritten und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

1 Einleitung

Für die Überwachung von Naturgefahren eignet sich eine Vielzahl geodätischer und geotechnischer Sensoren. Diese unterscheiden sich bezüglich Messgrösse, räumlicher und zeitlicher Auflösung, Genauigkeit sowie Kosten. Wie bei jeder Überwachungsmessung sollten das Sensorsystem und das Beobachtungsintervall so gewählt werden, dass die zu erwartenden Veränderungen der Messgrössen (in der Regel geometrische Veränderungen aufgrund eines geologischen Prozesses) zuverlässig und statistisch signifikant nachgewiesen werden können.

Folgende praktische Herausforderungen beeinflussen bei alpinen Naturgefahren zudem typischerweise die Auslegung des Messkonzepts:

- Grosse räumliche Ausdehnung
- Beschränkte Zugänglichkeit (alpines Gelände und/oder akute Gefährdungssituation)
- Wenige oder keine stabilen Zonen (Materialisierung von Fixpunkten schwierig oder unmöglich)
- Exposition gegenüber extremen Witterungsverhältnissen
- Vegetation, die Teile des zu überwachenden Geländes verdeckt

Trotz technischer Limitationen (insb. bei Schlechtwetter und dichter Vegetation) hat sich die druhngestützte Fotogrammetrie nicht nur als komplementäre, sondern auch als primäre Methode für die Überwachung unterschiedlicher Naturgefahren im alpinen Raum bewährt. Anhand ausgewählter Projekte der Grünenfelder und Partner AG sowie der Terradata AG aus den Jahren 2024 und 2025 werden in diesem Artikel verschiedene Analysemethoden und Visualisierungen vorgestellt, die bei der Kundschaft auf grossen Erfolg gestossen sind. Zudem wird gezeigt, wie die Kombination aus hochwertiger Hardware, praxistauglichen Flugbewilligungen und Datenerfassungsprozesse sowie einem webbasierten Datenviwer mit Fotogrammetrie- und GIS-Features eine grosse Effizienz- und Qualitätssteigerung gegenüber herkömmlichen Methoden ermöglicht.

Die nachfolgende Tabelle verschafft einen Überblick über die vorgestellten Projekte.

Tabelle 1: Vorgestellte Projektbeispiele der Grünenfelder und Partner AG und Terradata AG

Projekt	Brienz Rutsch (Felssturz, Schuttstrom)	Blockgletscher Hübschhorn (Murgang)	Bergsturz Kleines Nesthorn	Felssturz Starlera
Ort	Brienz/Brinzauls (GR)	Simplonpass (VS)	Blatten (VS)	Innerferrera (GR)
Ausdehnung [km ²]	2.9	3.7	5 bis 24 (Helikopter), 3.9 (Drohne)	0.004
Höhenlage [m. ü. M.]	950 bis 1.800	1.600 bis 3.000	1.300 bis 3.400 (Helikopter), 1.400 bis 2.700 (Drohne)	1.550 bis 1.610
Geschwindigkeit [m/a]	0.2 bis 5, kurzzeitig mehr als 20 m/d	2 bis 20 (anfangs unbekannt)	katastrophaler Bergsturz	0 bis 0.02
Beobachtungs- intervall	halbjährlich bis täglich	monatlich während schneefreier Periode	monatlich (Helikopter, während 5 Monaten), wöchentlich bis täglich (autonome Drohne)	halbjährlich

Die Projekte weisen Ausdehnungen und Deformationen in unterschiedlichsten Größenordnungen auf. Diese Unterschiede werden bei der fotogrammetrischen Flugplanung sowie bei der Georeferenzierung der Daten berücksichtigt. Alternative Messtechniken wie Radarinterferometrie oder punktuelle GNSS-Messungen werden, wo verfügbar, für die Diskussion der Ergebnisse miteinbezogen. Es handelt sich dabei jedoch nicht um wissenschaftlich angelegte Experimente zur Validierung der Fotogrammetrie, sondern um eine praktische Einschätzung zum Nutzen der verschiedenen Mess- und Analyseergebnisse.

2 Webportal TEDAMOS

Während für Feldarbeiten je nach Projekt unterschiedliche Hardware und Methoden erforderlich sind, kommt [TEDAMOS](#) bei allen vorgestellten Projekten gleichermassen zum Einsatz. Es handelt sich dabei um einen webbasierten Datenviewer, welcher von Terradata AG entwickelt wurde. Nebst klassischen geodätischen und geotechnischen Sensordaten können mit dem Modul TEDAMOS Pixel auch fotogrammetrische Aufnahmen prozessiert und visualisiert werden.

Sofern die Passpunkte mit einem gut detektierbaren Muster (z. B. Schachbrett) signalisiert wurden, erfolgt die fotogrammetrische Auswertung ab dem Upload der Rohdaten bis hin zu den fertig visualisierten Produkten vollständig automatisiert. Qualitätschecks und die Wahl optimaler Settings erfolgen durch Algorithmen aus Eigenentwicklung, die umfangreicher praktischer Erfahrungswerte optimiert wurden. So können eine schnelle Auswertung und eine standardisierte Qualität erreicht werden.

Fotogrammetrische Daten (Einzelepochen) können wie folgt visualisiert werden:

- Orthofoto mit Hintergrundkarte und georeferenzierte Planüberlagerungen (Kartendienste und CAD-Dateien)
- Raster-DSM (2.5D-Oberflächenmodell) mit Hillshade oder DTM (falls Klassifizierung vorhanden)
- Zeichnen/Messen von Punkten, Linien, Flächen inkl. Höheninformation
- Überlagerung von Symbolen, Vektoren und Diagrammen zusätzlicher Sensoren
- Viewer für Punktwolke und texturiertes Mesh

Vergleiche zwischen mehreren Epochen sind ebenfalls möglich:

- Höhendifferenz zweier Raster-DSM/DTM oder Höhendifferenz zu 2.5D-Plandaten
- Vergleich einer beliebigen Anzahl Epochen entlang einer Polylinie (Höhenprofil)
- Volumendifferenz (Auf- und Abtrag) innerhalb eines Polygons
- Feature Tracking: Verschiebungsvektoren von diskreten Features (je nach Datensatz basierend auf Punktwolkenkorrelation oder Bildmessungen)

3 Brienzer Rutsch

Die Grünenfelder und Partner AG hat im Jahr 2025 11 fotogrammetrische Aufnahmen der Brienzer Rutschs im Auftrag der Gemeinde Albula/Alvra prozessiert. Nebst eigenen Aufnahmen wurden Daten der Firma Sixense Helimap SA sowie des WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF verarbeitet.

3.1 Messkonzept Brienzer Rutsch

Die Genauigkeitsanforderungen sind moderat, da die Bewegungen schnell sind und der Hang mit zahlreichen Sensoren überwacht wird. Unter anderem sind automatische GNSS-Sensoren, Totalstationen, Radar-Interferometrie und ein Steinschlagradar im Einsatz.



Abb. 1: WingtraOne GEN II der Grünenfelder und Partner AG im Einsatz in Brienzer Rutsch.

Die Aufnahmen mit einer Auflösung von 4 cm werden im Normalfall mittels CORS-Daten (Continuously Operating Reference Station) des Korrekturdiensts [Refnet](#) sowie mehreren Passpunkten georeferenziert. Zusätzlich wurde der Einsatz einer lokalen Referenzstation mit einem genau bestimmten Festpunkt ausserhalb des Rutschgebiets vorbereitet und getestet. Die Passpunkte befinden sich im Bereich der Strassen westlich und östlich ausserhalb des Rutschgebiets und werden periodisch kontrolliert. Im höher gelegenen Bereich des Gebiets können keine Passpunkte installiert oder temporär signalisiert werden. Die Datenerfassung erfolgte mit einer Flächendrohne vom Typ WingtraOne GEN II (Abb. 1), ausgestattet mit Vollformatkamera.

Das Messintervall ist für dieses Projekt nicht fix definiert, sondern wird durch den Frühwarnservice der Gemeinde Albula laufend an die aktuellen Entwicklungen angepasst. Eine mögliche dauerhafte Installation einer autonomen Drohnenlösung wurde diskutiert, aber im Gesamtbild als nicht lohnend betrachtet.

3.2 Resultate und Erfahrungswerte Brienzer Rutsch

Kosten

Die Wahl des Messkonzepts inkl. Preisgestaltung hat sich für das Jahr 2025 als richtig erwiesen. Trotz einer Zuspitzung der Ereignisse Ende November konnte eine ausreichende Anzahl Drohnenflüge durchgeführt und jeweils über Nacht prozessiert werden. Da die Beschleunigung des Hangs im Bereich «Plateau Ost» nur über wenige Tage anhielt (Abb. 2) und sich von einem anbahnenden Felssturz in einen langsamen Schuttstrom umwandelte, bestätigte sich die gezielte Auslösung manueller Drohnenaufnahmen mit Abstand als kostengünstigste Variante. Gegenüber einer Variante mit autonomer Drohne (z. B. DJI Doack) konnten gemäss internen Schätzungen ca. 60% an Kosten eingespart werden. Gegenüber Helikopter-Aufnahmen zu denselben Zeitpunkten konnten basierend auf groben Richtpreisen verschiedener Schweizer Anbieter über 80% an Kosten gespart werden.



Abb. 2: Weg-Zeit-Diagramm des permanenten GNSS-Rovers im Bereich «Plateau Ost» im Zeitraum 04.11.2025 bis 10.12.2025. Orange: horizontale Verschiebung, grün: vertikale Verschiebung. Durchgeführte Drohnenflüge sind auf der Zeitachse rot markiert.

Wahl der Drohne

Da die Durchführung von BVLOS-Einsätzen (Beyond Visual Line of Sight) erhebliche administrative und sicherheitstechnische Hürden mit sich bringt, ist der Einsatz einer Flächendrohne für diese Grösse von Fluggebiet optimal. Trotz beschränkter Startmöglichkeiten am Rande der Sperrzone konnten die Flüge dank der grossen und gut sichtbaren Drohne in VLOS (Visual Line of Sight) erfolgen. Zudem konnten die Aufnahmen auch bei marginalen Wetterbedingungen in sehr kurzen Wetterfenstern erfolgen, was mit einer langsameren Multirotor-Drohne noch schwieriger gewesen wäre.

Aufgrund der Geländeform ist mit einer Flächendrohne eine Flughöhe deutlich höher als die nach EASA-Vorschriften üblichen 120 m über Grund erforderlich. Der sichere und legale Betrieb unter diesen Umständen ist mit der SORA-Bewilligung (Specific Operations Risk Assessment) und darauf abgestimmten Verfahren der Grünenfelder und Partner AG sichergestellt.

Fotogrammetrische Resultate

Die fotogrammetrischen Produkte erfüllen beim Brienzer Rutsch primär folgende Funktionen:

- Überwachung der Teilgebiete, welche von anderen Sensoren schlecht abgedeckt sind (insb. die höher sowie flach liegenden Zonen, welche vom terrestrischen Radar nur schleifend erfasst werden).
- Schnelle und zuverlässige geometrische Messungen und Berechnungen wie beispielsweise Abbruchvolumen und Höhenunterschiede zur Validierung geologischer Modelle und Prognosen
- Visueller Gesamtüberblick über die Entwicklungen am Rutschhang (gezeigt am Beispiel «Plateau Ost» in Abb. 4 sowie im flächendeckenden Höhenvergleich der Rastermodelle Abb. 3)

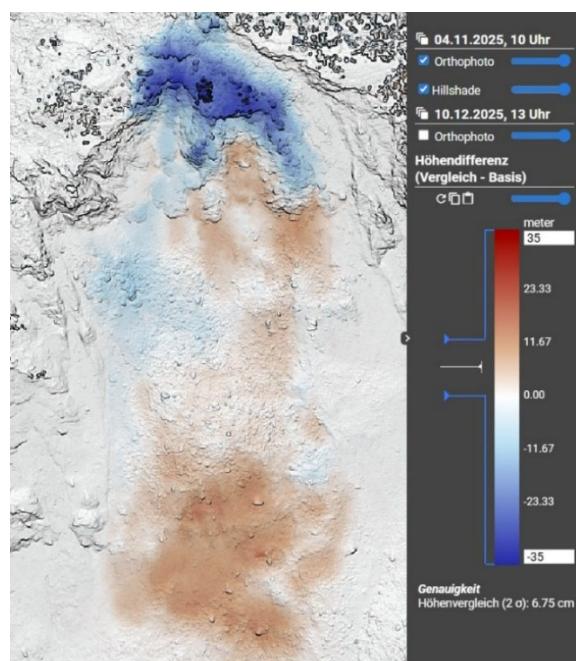


Abb. 3: Direkter Höhenvergleich der Epochen vom 04.11.2025 und 10.12.2025

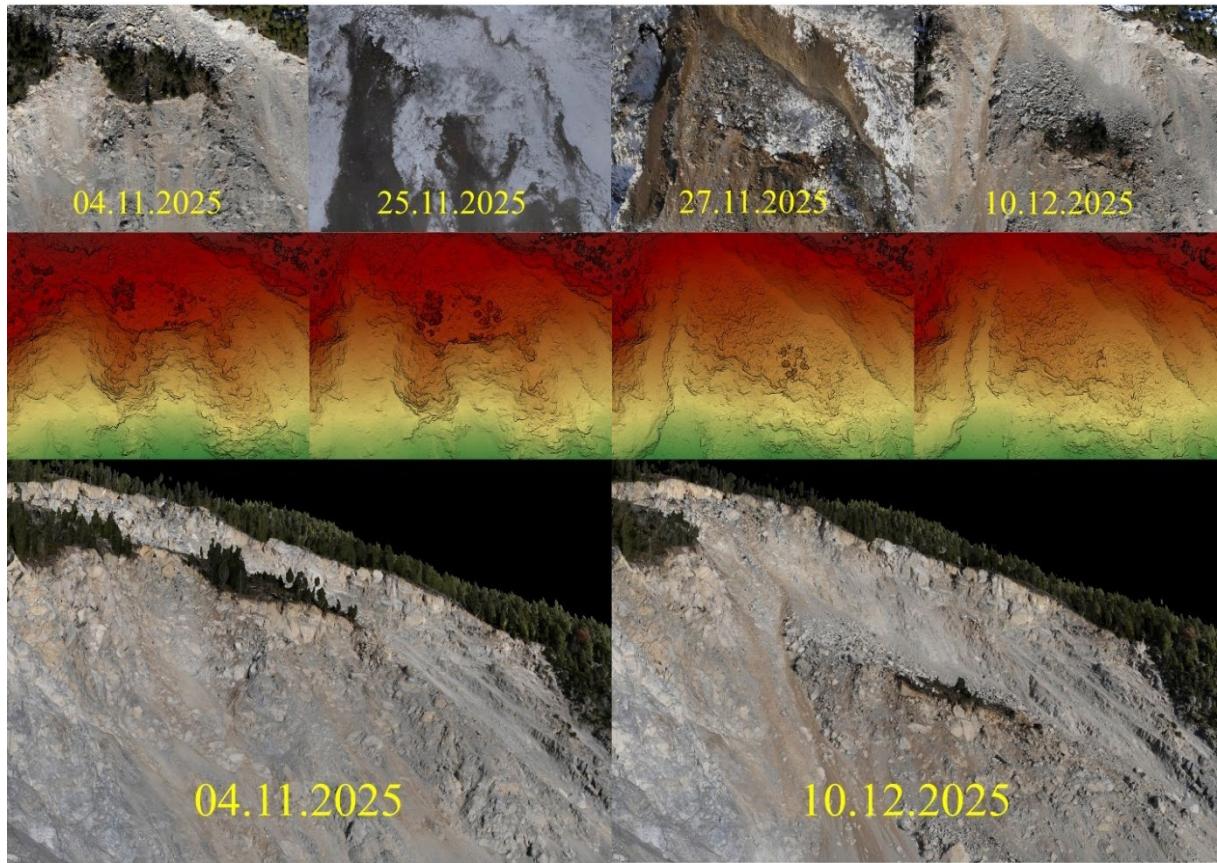


Abb. 4: Orthofoto (oben), Raster-DSM (Mitte) und texturiertes Mesh (unten) des Plateau Ost im Zeitraum November bis Dezember 2025. Die horizontale und vertikale Verschiebung der Überreste des Plateaus beträgt jeweils ca. 50 m.

3.3 Vergleich mit weiterführenden Analysen des SLF

Wie in Abb. 5 links gut sichtbar, eignet sich der direkte Vergleich der Höhenmodelle nicht optimal für die Analyse der Vorwärtsgeschwindigkeit der Rutschung. Es entstehen schattenartige Artefakte im Höhenvergleich, da die Horizontalkomponente nicht geschätzt und bei der Berechnung der Höhendifferenz nicht korrigiert wird. Die in /Manconi et al. 2024/ beschriebene DIC-Methode (digital image correlation) ermöglicht eine komponentenweise Bewegungsanalyse und zeigt anhand der exemplarisch zur Verfügung gestellten Auswertung in Abb. 5 rechts für den Schuttstrom unterhalb des Plateaus plausible Resultate in der Nord-/Süd-Komponente. Es wäre zu erwarten, dass das in Abschnitt 4.2 gezeigte punktwolkenbasierte Feature Tracking vergleichbare Resultate liefert. Aktuell liegt für den Brienzer Rutsch jedoch keine Analyse mit Feature Tracking vor, die einen direkten Vergleich der beiden Methoden ermöglichen würde.

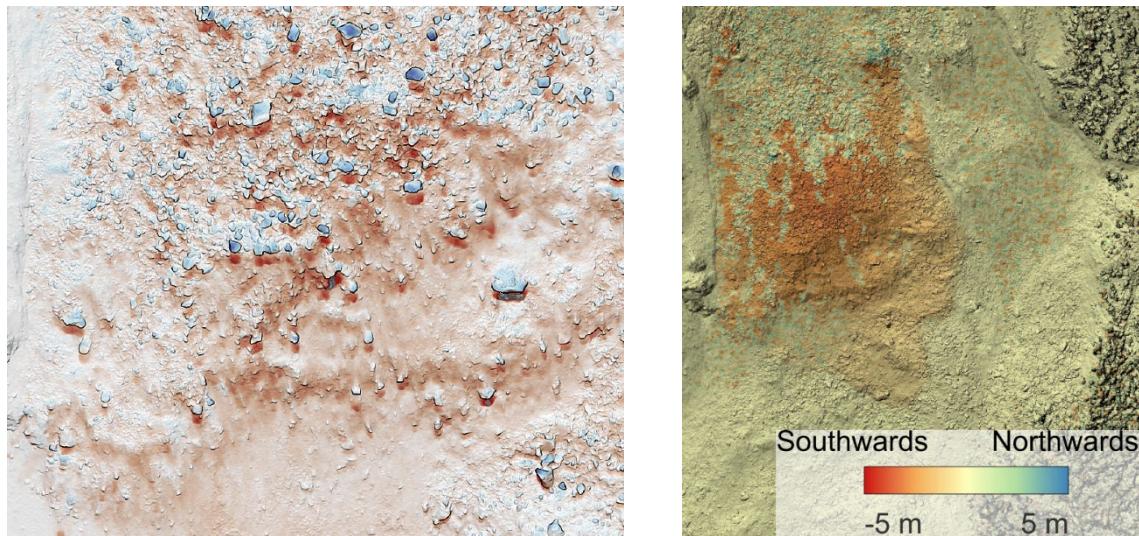


Abb. 5: Gegenüberstellung von direktem Höhenvergleich mit gut erkennbaren «Schattierungartefakten» (links) und Horizontalkomponente aus DIC (rechts) im Bereich der «Schutthalde oben». Es handelt sich um geringfügig andere Zeiträume und Bildausschnitte und somit um einen nicht quantifizierbaren Vergleich. Die exemplarische DIC-Auswertung wurde von der [Forschungsgruppe für alpine Fernerkundung](#) des SLF zur Verfügung gestellt.

Bei sehr grossen Unterschieden zwischen zwei Epochen (beispielsweise im Bereich des stark beschleunigten und stückweise zerfallenden Plateaus Ost) schlägt die DIC-Analyse fehl. Im vorliegenden Fall wäre somit eine höhere zeitliche Auflösung erforderlich, um die Kinematik des Plateaus Ost mit DIC detailliert abzubilden. Aus praktischer Sicht wäre aber aufgrund der Witterung selbst mit einem ständig verfügbaren (autonomen) Drohnenystem kaum eine ausreichende Messfrequenz erreichbar gewesen. In einer solchen Situation garantieren somit nur die direkten Vergleichsmethoden ein Resultat. Wenn damit auch keine automatische komponentenweise Bewegungsanalyse möglich ist, so können mit TEDAMOS Pixel durch Schnitte im Höhenprofil zumindest manuell Abschätzungen über horizontale und vertikale Verschiebungen getroffen werden (Abb. 6).

Bei anderen Messtechniken, welche intrinsisch auf Korrelationsmechanismen beruhen (beispielsweise Radarinterferometrie) können aufgrund abrupter Veränderungen ebenfalls fehlerhafte Resultate entstehen. Eindrücklich wurde dies in /Manconi 2021/ gezeigt, wo DInSAR-Messungen (differenzielle Radarinterferometrie) mit geodätischen Kontrollmessungen verglichen wurden. Der sogenannte «phase aliasing»-Effekt führte am Beispiel der Moosfluh-Rutschung dazu, dass eine (geodätisch nachgewiesen) beschleunigte Bewegung mittels DInSAR-Methodik fälschlicherweise als linearer Bewegung aufgefasst wurde.

Punktuelle geodätische Sensoren oder Fotogrammetrie (direkte Vergleiche ohne korrelationsbasierte Auswertung) können also helfen, Radar-Messungen zu verifizieren und mögliche Cycle Slips festzustellen.



Abb. 6: Längsschnitt durch das Plateau Ost (2.5D-Oberflächenmodell) zu verschiedenen Zeitständen im Zeitraum 04.11.2025 bis 10.12.2025.

4 Blockgletscher Hübschhorn (Murgang)

Im Unterschied zum Brienzer Rutsch waren bei Messbeginn im Frühjahr 2024 keinerlei Geodaten verfügbar, die einen systematischen Aufschluss über die Bewegungen des Bergs gaben. Die Überwachung wurde mit Fotogrammetrie als primäres Messsystem lanciert. Eine Machbarkeitsanalyse sowie ein Preisvergleich mit Helikopteraufnahmen führten zum Entscheid, die Aufnahmen mit einer Flächendrohne durchzuführen. Weitere Sensoren wurden kurz nach Projektbeginn aufgrund eines grossen Murgangs installiert. Diese dienen primär einem Alarmsystem zur automatischen Strassensperrung im Fall eines grösseren Ereignisses. Ein weiterer Unterschied zum Brienzer Rutsch ist der Umstand, dass die Massenverschiebungen am Hübschhorn im Zusammenhang mit dem Auftauen des Permafrosts stehen. Der Brienzer Rutsch hingegen liegt deutlich unter der Permafrostgrenze.

4.1 Messkonzept Blockgletscher Hübschhorn

Die Herangehensweise für die Überwachung des Hübschhorns und der sich darunter befindenden Galerie Engi der Simplonpassstrasse ist technisch vergleichbar mit der Befliegung des Brienzer Rutschs. Das Gebiet ist jedoch grösser und höher gelegen, was in der Praxis einen

VLOS-Flug unmöglich macht (auch dort kann das Zentrum des Gebiets aus Sicherheitsgründen nicht betreten werden und eignet sich zudem nicht als Startplatz). Für die Durchführung des Drohnenflugs nach dem EVLOS-Prinzip (Extended Visual Line of Sight) wird ein Beobachter eingesetzt. Zudem muss die Drohne von verschiedenen Positionen gestartet werden, die teilweise nur zu Fuss (ca. 1h Aufstieg) erreichbar sind.

4.2 Resultate und Erfahrungswerte Blockgletscher Hübschhorn

Die in den Sommermonaten 2024 und 2025 erfassten Daten weisen eine hervorragende Höhengenauigkeit und eine, gemessen an der Ausdehnung von knapp 4 km², hohe Auflösung von 2 cm/Pixel auf. Die höher gelegenen Zonen, die stark in Bewegung und regelmässig von Abbrüchen betroffen sind, sind vegetationsfrei und lassen sich mittels Feature Tracking sehr gut beobachten. Hierzu wird ein punktwolkenbasierter Korrelationsalgorithmus verwendet. Die resultierende Vektorschär kann interaktiv in der Karte als Verschiebung oder Geschwindigkeit sowie auch als Weg-Zeit-Diagramm einzelner Punkte betrachtet werden (Abb. 7).

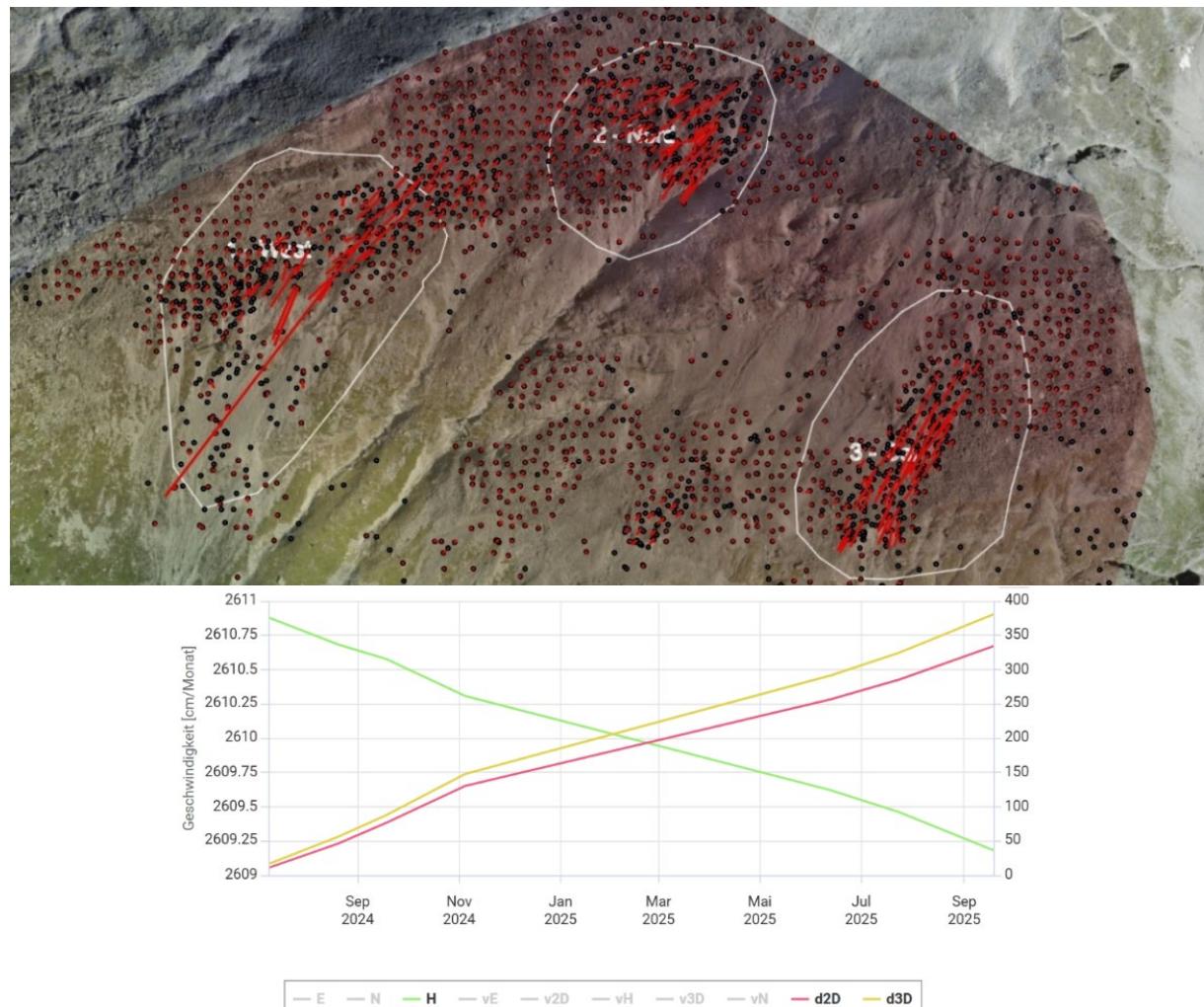


Abb. 7: Punktwolkenbasiertes Feature Tracking am Blockgletscher Hübschhorn mit Vektorschär (horizontale Geschwindigkeiten) und exemplarischem Weg-Zeit-Diagramm für ein Punktfeature mit 3D-Verschiebungs- und Geschwindigkeitskomponenten.

5 Bergsturz Kleines Nesthorn (Blatten VS)

Eine Deformationskamera zur Überwachung des Birchgletschers unterhalb des Kleinen Nesthorns registrierte Mitte Mai 2025 mehrere Felsabbrüche am Kleinen Nesthorn, die auf den Birchgletscher stürzten. Am 14. Mai wurde dadurch ein erster Murgang ausgelöst, worauf sich die Situation innert weniger Tage zuspitzte¹.

Am 19. Mai erfolgte ein erster Rapid Mapping Einsatz durch die swisstopo (Quick Orthofoto ohne Höheninformation). Zeitgleich begann die Terradata AG mit der Ausarbeitung eines Überwachungskonzepts im Auftrag des Kantons Wallis. Innert wenigen Tagen folgte eine erste kombinierte Aufnahme mit LiDAR und Fotogrammetrie durch Sixense Helimap SA sowie die Datenprozessierung und -visualisierung mit TEDAMOS. Während der Planung weiterer Folgemessungen mit Drohnen ereignete sich am 28. Mai ein grosser Bergsturz, bei dem das mittlerweile evakuierte Dorf Blatten nahezu vollständig verschüttet wurde.

Am Folgetag wurde ein weiterer Helikopterflug durchgeführt und prozessiert und ab dem 30. Mai war in Kooperation mit der Remote Vision GmbH ein autonomes Drohnenystem im Einsatz, um den unteren Teil des Gebiets (primär das verschüttete Dorf und der sich aufgestaute See) täglich zu vermessen.

5.1 Erkenntnisse aus dem Messkonzept Blatten

Bei diesem sehr grossen und anspruchsvollen Gebiet mit steilen Felsen, Gletscher und einer Höhendifferenz von über 2000 m erwies sich ein möglichst schneller und flächendeckender Helikoptereinsatz als beste und zuverlässigste Methode. Angesichts der akuten Gefährdung des gesamten Dorfes spielten dabei die Kosten eine untergeordnete Rolle. Zudem wäre der Einsatz einer Drohne sowohl administrativ (BVLOS) als auch technisch (begrenzte Flugleistung im hochalpinen Gelände bei starkem Wind und teilweise marginalen Sichtverhältnissen) kurzfristig nicht umsetzbar gewesen.

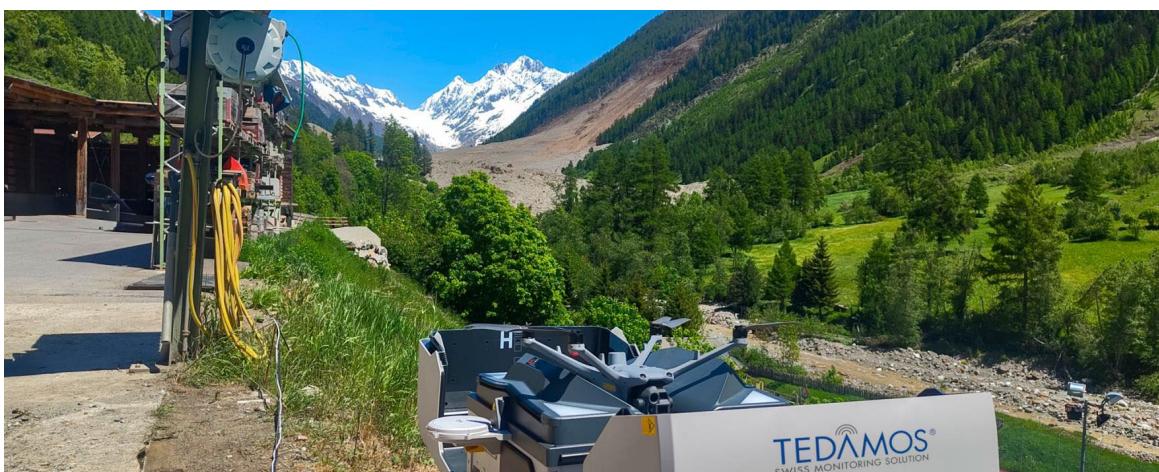


Abb. 8: Eines von zwei DJI Dock-Systemen für die tägliche Überwachung des Dorfes Blatten VS.

¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Bergsturz_von_Blatten

Das kurz nach dem Bergsturz installierte Drohnensystem (Abb. 8) ist BVLOS-zertifiziert. Dies ermöglichte einen neuen drohnenbasierten Ansatz für fortlaufende Aufnahmen, der in diesem Fall die meisten Schwachpunkte eines manuellen Drohneneinsatzes lösen konnte. Das Fluggebiet wurde auf die niedrigeren Höhenlagen beschränkt, zudem konnten die Einsätze dank des ständig einsatzbereiten Systems optimal auf die Windverhältnisse abgestimmt werden. Durch eine Aufstockung auf zwei zeitgleich operierende Fluggeräte wurde die tägliche Befliegung eines nahezu 4 km² grossen Gebiets ermöglicht und der Bedarf für Aufnahmen aus dem Helikopter auf einen Einsatz pro Monat gesenkt. Dieses System ist auf längere Sicht auch günstiger als manuelle Einsätze, da die Anreisezeit entfällt. Es muss jedoch im Betrieb durch eine Person mit BVLOS-Ausbildung überwacht werden und kann somit nach den aktuellen Vorschriften nicht vollständig autonom agieren. Die bisherige Praxiserfahrung bestätigt diese Forderung, da Konflikte mit anderen Luftfahrzeugen nicht in allen Szenarien automatisch gelöst werden können.

5.2 Resultate und Erfahrungswerte Blatten

Die fotogrammetrische Überwachung des Dorfes mit dem sich aufstauenden Fluss Lonza war für die Behörden eine äusserst relevante, zuverlässige und stets aktuelle Datengrundlage. Auch ohne Veröffentlichung quantitativer Angaben lässt sich an Abb. 9 erahnen, wie mittels der online verfügbaren Werkzeuge schnell ein sehr genaues Bild der Lage geschaffen werden konnte. Sowohl visuell über die Veränderung des Orthofotos aber auch dank präziser Höhenangaben konnte die Situation laufend beurteilt werden. Eines der wichtigsten Kriterien für den Praxisnutzen der Überwachungsmessungen war in diesem Fall nicht die Genauigkeit, sondern zuverlässige, schnelle und möglichst benutzerfreundliche Bereitstellung der Daten. Die Verwaltung sämtlicher Ergebnisse aus den Helikopter- und Drohnenaufnahmen über eine einzige webbasierte Plattform trug massgeblich dazu bei, diese Ansprüche zu erfüllen.



Abb. 9: Höhenprofil entlang Polylinie durch das verschüttete Gebiet in Blatten. Exaktes Aufnahmedatum und Höhenskala verdeckt.

6 Felssturz Starlera

Die Überwachung des Felssturzes Starlera sollte als Demonstrationsprojekt in Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt des Kantons Graubünden dienen, um den Nutzen von Fotogrammetrie für die hochgenaue Überwachung kleinräumiger Felsstürze zu prüfen. Leider musste das Projekt im Zuge einer Felsräumung nach einer einzigen, terminlich vorgezogenen Folgemessung abgebrochen werden. Dennoch konnte eine sehr hohe Messgenauigkeit und ein entsprechendes Potenzial für die Überwachung sehr langsamer Prozesse nachgewiesen werden.



Abb. 10: Totalstation, Vermessungsdrohne und Spezialtarget zur Überwachung des Felssturzes Starlera im Averstal.

6.1 Erreichbare Genauigkeit

Zum Einsatz kamen 12 tachymetrisch eingemessene Spezialtargets als Passpunkte, die das ganze Gebiet engmaschig abdecken. Die Installation erfolgte durch Fachpersonen als Arbeit am hängenden Seil. Die fotogrammetrischen Aufnahmen wurden mit hoher Überlappung und unterschiedlichen Kameraausrichtungen erstellt. Dazu wurde eine Multirotor Drohne mit Vollformatkamera eingesetzt. Ein Teil der Messeinrichtung ist in Abb. 10 ersichtlich.

Im Bereich der stabilen Strasse beträgt der als Messunsicherheit interpretierbare Höhenunterschied zwischen den beiden Epochen flächendeckend weniger als 5 mm (siehe Abb. 11 links). Im Bereich scharfer Felskanten und starken Überhängen ist mit einer reduzierten Genauigkeit aufgrund der leicht unterschiedlichen 3D-Rekonstruktionen zu rechnen. Ebenfalls sind Teile der Felsen mit Vegetation bedeckt, die stellenweise einen aussagekräftigen Vergleich verhindert. Insgesamt wird auf wohldefinierten Oberflächen eine flächendeckende Messgenauigkeit erreicht, die sich nur wenig von einer direkten reflektorlosen Messung mit Totalstation oder terrestrischen Laserscanner unterscheidet.

6.2 Herausforderungen bei der Visualisierung

Die Beurteilung und Visualisierung der tatsächlichen Deformationen gestaltete sich als schwierig und wurde aufgrund des vorzeitigen Projektabbruchs nicht abschliessend gelöst. Verschiedene Ansätze wie die Auswertung in einem um 45° rotierten Koordinatensystem (Kippung des steilen Hangs in die Horizontalebene), die Berechnung von Verschiebungsvektoren aus Bildmessungen markanter Punkte aber auch direkte Punktwolkenvergleiche nach der [M3C2](#)-Methodik wurden geprüft.

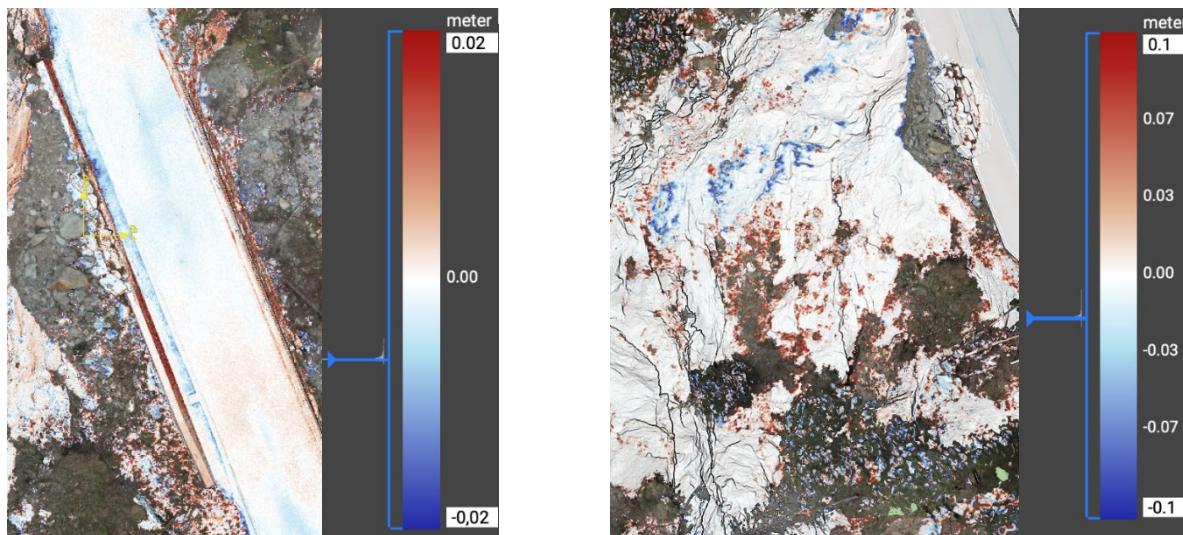


Abb. 11: Höhenvergleich im Strassenbereich (links, Farbskala ± 2 cm) und im Bereich des Felssturzes (rechts, Koordinatensystem um 45° verkippt, Farbskala ± 10 cm).

Unabhängig von der Berechnungsmethode zeigt sich, dass eine Visualisierung mittels diskreter Vektoren mehrere Vorteile gegenüber einer flächenhaften Einfärbung des Rastermodells (Abb. 11 rechts) oder der Punktwolke hat: Im Gegensatz zu Farbskalen, die bei stark variierenden Deformationswerten entweder schnell saturieren oder Farbbereiche ganz abschneiden, funktioniert eine Vektorendarstellung für eine deutlich grössere Bandbreite an Verschiebungs- oder Geschwindigkeitswerten. Zudem können Flächen mit Bewuchs gezielt aus der Analyse ausgeschlossen werden. Letztlich wird bei einer vektorbasierten Darstellung das Orthofoto nicht von einem Falschfarbenbild überdeckt, was eine sofortige visuelle Kontrolle der Oberflächenbeschaffenheit (Vegetation vs Fels) im Bereich der Punktfeatures ermöglicht. Diese Visualisierungsform findet deshalb auch in anderen fotogrammetrischen Überwachungsprojekten mit hohem Vegetationsanteil Anwendung (beispielsweise am Riedberg bei Gampel VS, Abb. 12).

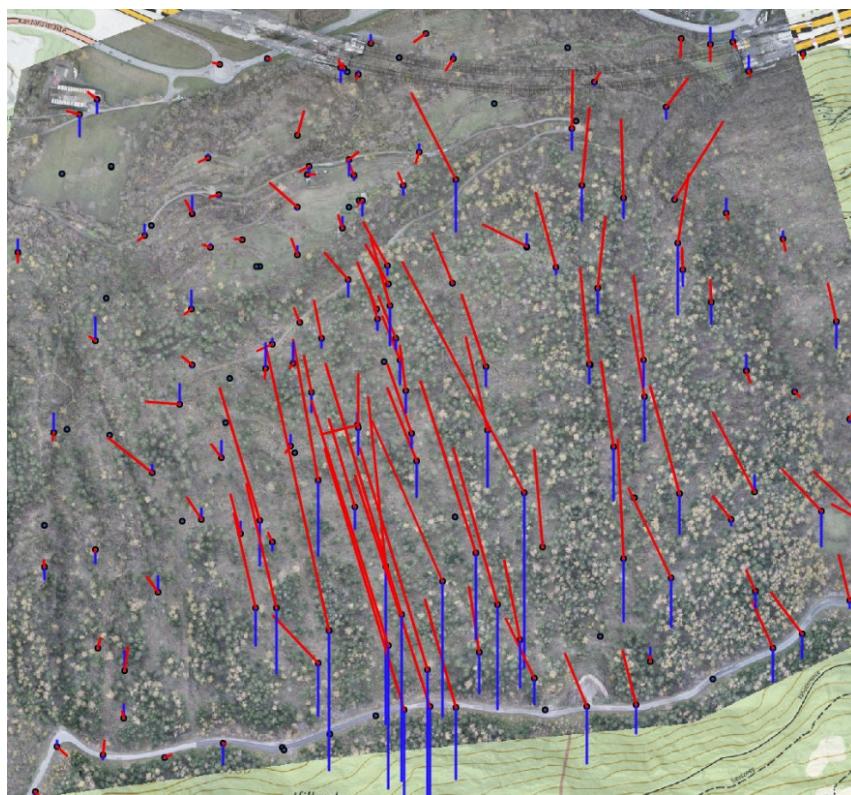


Abb. 12: Vektorbasierte Visualisierung der Rutschung Riedberg VS mit Orthofoto-Hintergrund.

7 Fazit

Die vorgestellten Projekte bieten einen Überblick über unterschiedliche Anwendungsfälle von Fotogrammetrie im Zusammenhang mit alpinen Naturgefahren. Mehrfach wurde gezeigt, dass der Einsatz von Drohnen als kostengünstige Alternative zu Helikoptereinsätzen eine bessere Datengrundlage durch häufigere (bis hin zu täglichen) Aufnahmen ermöglichen kann. Die automatisierte Auswertung sowie die digitale Verwaltung und Visualisierung der Daten mit TEDAMOS erwies sich in verschiedenen Projekten als wesentliches Element zur termingerechten und für den Endkunden benutzerfreundlichen Lösung der Aufgabenstellung. Die erreichbaren Genauigkeiten und räumlichen Ausdehnungen erlauben den Einsatz in einer Vielfalt an Szenarien und stellen gleichzeitig hohe Anforderungen an die Methoden der Deformationsanalyse und die Visualisierung der Resultate.

Literatur

- MANCONI, A. (2021): How phase aliasing limits systematic space-borne DInSAR monitoring and failure forecast of alpine landslides. In: *Engineering Geology*, 287, 106094. doi:10.1016/j.enggeo.2021.106094
- MANCONI, A.; JONES, N.; LOEW, S.; STROZZI, T.; CADUFF, R.; WEGMUELLER, U. (2024): Monitoring surface deformation with spaceborne radar interferometry in landslide complexes: insights from the Brienz/Brinzauls slope instability. In: *Swiss Alps. Landslides*, 21(10), 2519–2533. doi:10.1007/s10346-024-02291-z