

Felssturz Vals: Monitoring mit geodätischen, geotechnischen und radarinterferometrischen Sensoren

Christine Mayerhofer, Lienhart Troyer (Trigonos ZT GmbH)

TRIGONOS ZT GmbH Ingenieurkonsulenten für Vermessungswesen, Schwaz

1. Zusammenfassung

Im Zuge des Felssturzes vom 24.12.2017 in Vals stürzten rund 120.000 m³ Felsmasse aus der orographisch rechten Talflanke des Valser Tals ab. Trotz meterhoher Verschüttung der Straße forderte der Felssturz keine Opfer, weshalb dieser auch als „Weihnachtswunder“ bekannt ist.

In diesem Beitrag werden die Erfahrungen mit dem Betrieb der seit Februar 2018 installierten Monitoringsysteme zusammengefasst, welche neben der Funktion als Warnsystem auch zum besseren Prozessverständnis in Vals beitragen.

Im Auftrag der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) und in Zusammenarbeit mit der Abteilung Geoinformation des Amtes der Tiroler Landesregierung wird von Trigonos seit Februar 2018 ein vollautomatisiertes tachymetrisches Monitoring sowie ab August 2018 eine automatische Rissweitenmessung – beide Systeme in Echtzeit - betrieben. Automatisierte Warnmeldungen werden bei Überschreiten von absoluten und geschwindigkeitsbezogenen Grenzwerten generiert.

Seit Juni 2019 wurde über einen Zeitraum von einem Jahr zusätzlich ein Testprojekt mit einem interferometrischen Radar durchgeführt, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser wetterunabhängigen und vollflächig messenden Technologie unter realen Bedingungen zu testen und Methoden zur korrekten Georeferenzierung der Ergebnisse zu entwickeln. In einem Versuchsaufbau wurden die Genauigkeiten von tachymetrisch und interferometrisch gemessenen Verschiebungen verglichen.

2. Einleitung

Am 24.12.2017 kam es an der „Tumelers Wand“, welche sich auf der orographisch rechten Seite des Valser Tals befindet, zu einem Bergsturz. Bei diesem Ereignis stürzten ca. 120.000 m³ Felsmasse aufgrund eines großflächigen „Keilversagens“ ins Tal und verschütteten dabei Teile der Landesstraße L230. Wie durch ein Wunder gab es weder Tote noch Verletzte noch wurden die nahestehenden Häuser beschädigt. Nach Begutachtung durch die Landesgeologie sowie erfolgter Absicherung des betroffenen Gebiets durch das Österreichische Bundesheer konnten die bestehenden Hausevakuierungen aufgehoben werden und unter Aufsicht der Landesgeologie mit dem Räumen der Landesstraße begonnen werden.

Seit dem 27.12.2017 wurden von der Abteilung Geoinformation terrestrische Laserscannmessungen zuerst in sehr kurz aufeinanderfolgenden Intervallen, danach in regelmäßigen größeren Intervallen durchgeführt, anhand derer Ausbrüche im Nachhinein gut detektiert und flächenhaft dargestellt werden können.

Nach Modellierung möglicher zukünftiger Sturzzenarien seitens der Wildbach- und Lawinerverbauung und der Landesgeologie wurde mit dem Bau von Schutzdämmen für die umliegenden Häuser sowie der Verlegung der Landesstraße begonnen (vgl. [1]).

Ein umfangreiches Deformations-Monitoringprogramm begleitete das Projekt, um unmittelbare Aussagen über Geschwindigkeit und eine allfällige Beschleunigung von Bewegungen zu erhalten.



Abbildung 1: Bauarbeiten im Juni 2020

Abbildung 2: Orthophoto Juni 2020 (UAV-Befliegung Trigonos)



3. Tachymetrisches und Rissmonitoring

Unmittelbar nach dem Ereignis wurde von der Abteilung Geoinformation des Amtes der Tiroler Landesregierung mit Unterstützung der Trigonos ZT GmbH ein automatisches tachymetrisches 3D-Monitoring installiert, mit Hilfe dessen 16 an Baumstümpfen und Felsen oberhalb und beiderseits der Ausbruchsnische montierte Prismen überwacht werden. Obwohl Baumstümpfe längerfristig nicht die zuverlässigste Art der Stabilisierung für Prismen darstellen, haben sie sich in der Praxis sehr bewährt. Sie erlauben im Akutfall eine sehr rasche Befestigung mit minimalen Materialaufwand und helfen so die Arbeitszeit im Gefährdungsbereich zu verkürzen.

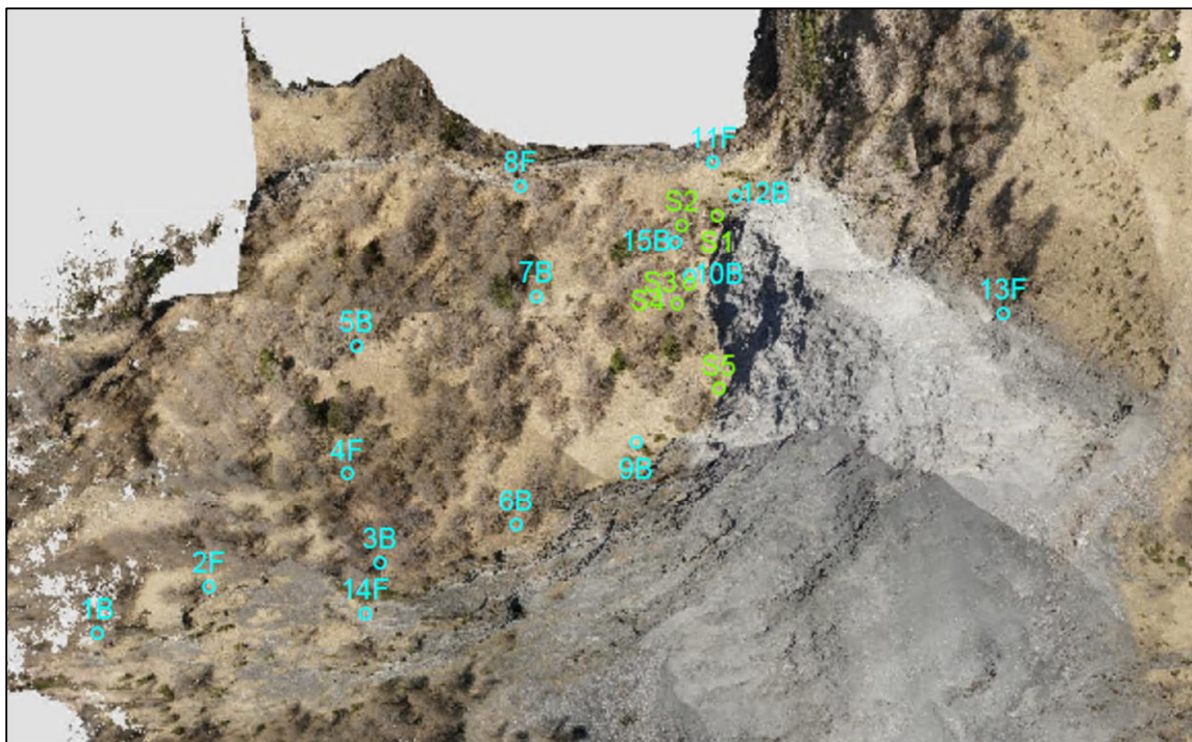


Abbildung 3: Überblick über die montierten Messprismen (hellblau) und Konvergenzextensometer/Fissurometer (grün)

Dieses System ist seit dem 01.02.2018 operativ und liefert stündlich aktuelle Werte, welche jederzeit als Zeit-Verformungs-, inverse Geschwindigkeit ($1/v$)- und Grundrissvektor-Grafik über ein Webportal für die Projektbeteiligten in Echtzeit einsehbar sind.

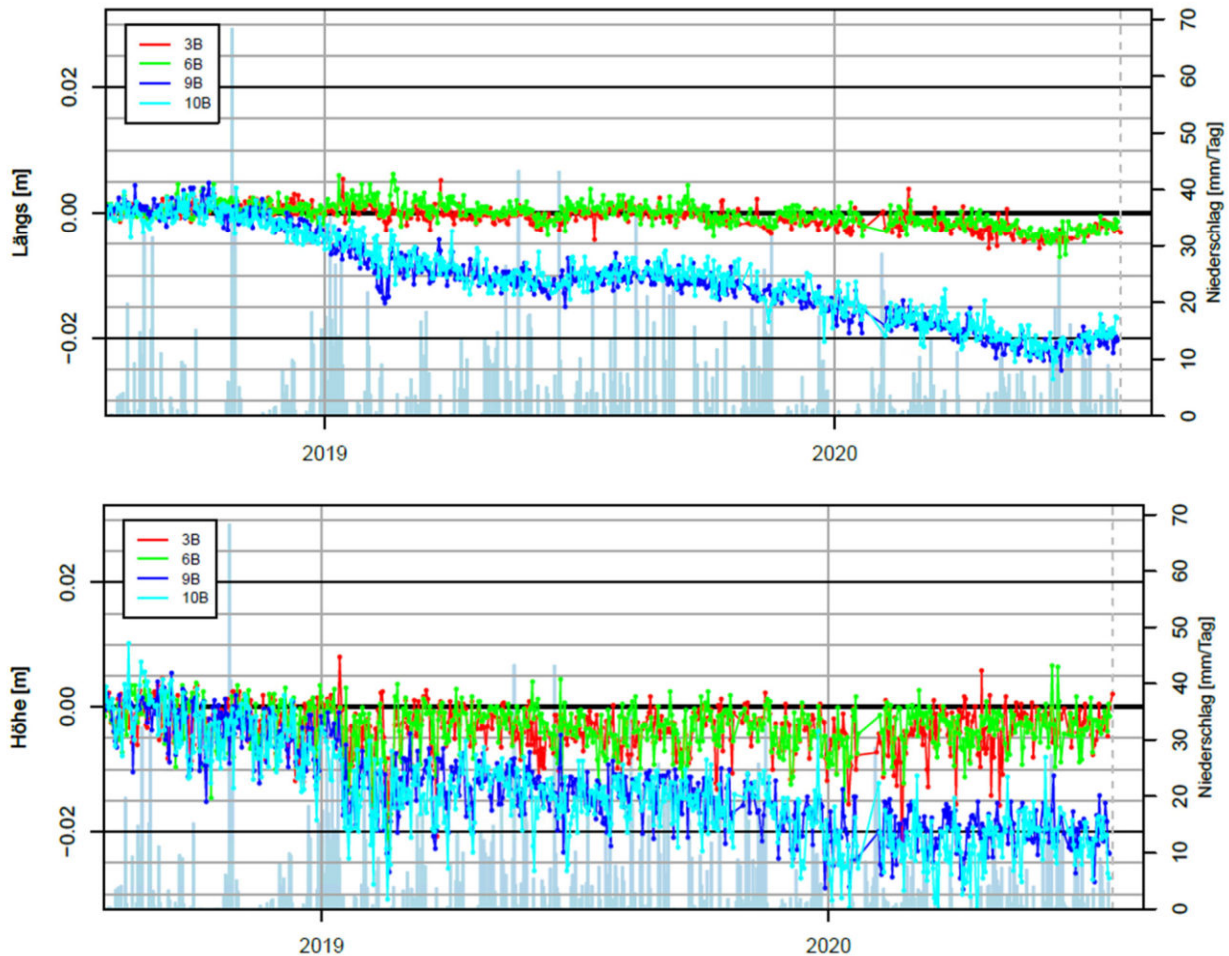


Abbildung 4: Messergebnisse der tachymetrischen Messpunkte mit den stärksten Deformationen

Die stärksten Deformationen weisen die beiden unterhalb des Hauptrisses befindlichen Messprismen 9B und 10B mit einer Setzung und einer Längsbewegung in Richtung Tal von jeweils 2 cm seit Messbeginn auf (siehe Abbildung 4). Um die Korrelation mit Niederschlagsdaten beurteilen zu können, wurde eine automatische Schnittstelle zum Messdatenserver des Hydrographischen Dienstes Tirol programmiert.

Die Messgenauigkeit (3σ) der Einzelmessung liegt bei großen Zielweiten von bis zu 800m beim tachymetrischen Monitoring bei 4 mm in der Lage und 9 mm in der Höhe.

Im Juli 2018 erfolgte im Auftrag der Wildbach- und Lawinenverbauung eine Erweiterung des Monitorings um zwei Konvergenzextensometer und drei Fissurometer, welche in den Spalten oberhalb der Abbruchkante installiert wurden. Dem Hauptriss mit einer Länge von etwa 25 m einer Öffnung von 1,5 m und einer Tiefe von 4 - 6 m galt dabei besondere Aufmerksamkeit. Dieser wurde mit zwei Konvergenzextensometern bestückt, welche mit einer maximalen Länge von 3 m auch größere Spalten überspannen können. Weitere kleine Spalten wurden mit entsprechend kompakteren Fissurometern versehen. Der Messbereich beider Sensorarten beträgt 20 cm.

Mit diesen ergänzenden Messdaten war sichergestellt, dass ungeachtet der Sichtverbindung, die für die tachymetrische Überwachung erforderlich ist, kontinuierlich Messdaten für eine allfällige Warnung vor weiteren größerdimensionalen Nachbrüchen vorlagen.

Die Öffnung der beiden Konvergenzextensometer im Haupttriss, welche 21 mm bzw. 13 mm seit der Nullmessung beträgt, stimmt sehr gut mit den Bewegungen der trigonometrischen Punkte von bis zu 20mm überein. Auch an den übrigen Rissen ist eine leichte Dehnung im Bereich von 1 bis 5 mm messbar. Die Messgenauigkeit (\pm) liegt bei den Fissurometern und Konvergenzextensometern zwischen 0,04 und 0,20 mm.



Abbildung 5: Fissurometer und Konvergenzextensometer

Um sowohl Installations- als auch Wartungsaufwand im Gefahrenbereich möglichst gering zu halten, wurde auf eine Low Power Wide Area Network (LPWAN) Lösung zurückgegriffen. Bei diesem System werden die Sensoren über batteriebetriebene Knotenpunkte ("Nodes") mit dem nötigen Strom versorgt. Von diesen Nodes erfolgt auch die Übermittlung der Messwerte über ISM Band zum Gateway im Tal. Das Gateway dient der Anbindung an den Datenserver. Durch den Einsatz dieses Systems konnte die Länge der zu verlegenden Kabel minimiert und die Stromversorgung im schwer zugänglichen Gelände stark vereinfacht werden. In Folge dessen beschränkt sich die regelmäßige Wartung im Gefahrenbereich beim gewählten Messintervall von einer Stunde auf einen Batterietausch im Jahr. Ein weiterer Vorteil dieses Systems ist, dass keine Mobilfunkverbindung im Bereich der Sensoren bestehen muss. Die Messergebnisse wurden in das Webportal eingebunden und sind somit ebenfalls in Echtzeit einsehbar.

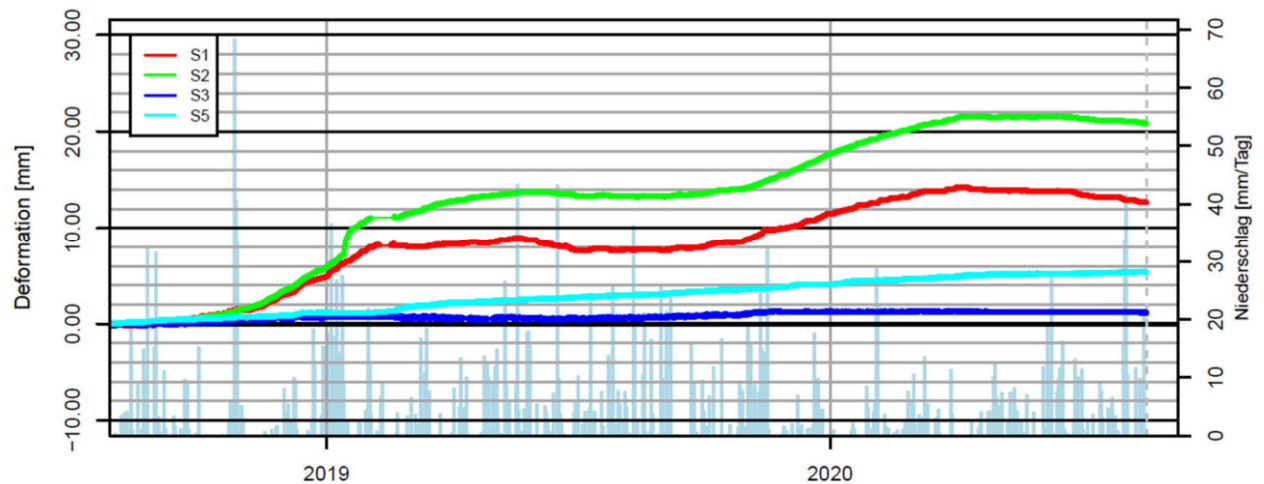


Abbildung 6: Messergebnisse der Fissurometer und Konvergenzextensometer

In den darauffolgenden Monaten erfolgte in Zusammenarbeit mit der Lawinen- und Wildbachverbauung die Ausarbeitung und Implementierung eines Warnsystems, welches bei Überschreitung von definierten Geschwindigkeits- sowie Gesamtdeformationsschranken automatisch SMS und E-Mails an die Projektbeteiligten sendet. Da eindeutige, mechanisch wirksame Grenzwerte in den Rissen bzw. den absturzgefährdeten Felspartien nicht definiert werden konnten, wurden die Grenzwerte anhand der Messgenauigkeit der beiden Systeme sowie der aktuellen Verformungsgeschwindigkeiten festgelegt (vgl. [2]).

Abbildung 7: Schneeeinwehung im Hauptriss (Winter 2018/2019)



Abbildung 8: Einhausung der Konvergenzextensometer durch die WLW (Sommer 2019)



Im Winter 2018/2019 wurden von den beiden Sensoren S1 und S2 im Hauptriss große Bewegungsraten registriert, ohne sich in den tachymetrischen Messpunkten im Nahbereich widerzuspiegeln. Bei einer Begehung im Gelände stellte sich heraus, dass dies jedoch nicht auf eine tatsächliche Öffnung des Spaltes, sondern auf die durch Schneeeinwehungen entstandene Last auf die nicht ausreichend geschützten Konvergenzextensometer zurückzuführen ist. Die Stäbe waren stark durchgebogen, einer sogar gebrochen, was sich in den Messdaten als Dehnung des Stabes äußerte. Um zukünftig Beeinträchtigungen der Messung durch Umwelteinflüsse wie Schnee oder Steinschlag zu vermeiden, stellte die WLV Gebietsbauleitung Mittleres Inntal im Sommer 2019 eine halbseitig fixierte und rundherum schützende Einhausung der Sensoren her. (siehe Abbildung 8)

Als zusätzliche Hilfestellung zur Bewertung der aktuellen Verformungen wird vierteljährlich ein Gesamtbericht der beiden Systeme generiert und übermittelt.

4. Ground-based InSAR

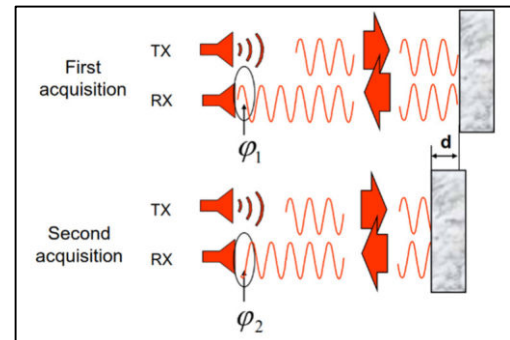
Die Kombination der beschriebenen Messmethoden in Vals vereint den Vorteil der Flexibilität und absoluten 3D Messgröße des Tachymeters mit der Wetterunabhängigkeit und der hohen Genauigkeit der Rissweitenmessung.

In den letzten Jahren wurde die ursprünglich aus dem Bereich der großen Tagebauten stammende Technologie des ground-based InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) auch bei Naturgefahren vermehrt für Deformationsmessungen eingesetzt. Die Vorteile dieser Technologie liegen in der Kombination von Wetterunabhängigkeit, vollflächiger Messung und einer hohen Reichweite. Um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Systeme für ein Szenario wie in Vals zu erproben, wurde von Trigonos mit Unterstützung der Abteilung Geoinformation des Landes Tirol ein Testprojekt in Vals gestartet. Das ground-based InSAR, nachfolgend auch als GBinSAR oder Radar abgekürzt, war am Felssturz Vals für etwas mehr als ein Jahr im Einsatz. Während dieser Zeit war es möglich unterschiedliche Auswerteverfahren zu testen, um die Möglichkeiten und Genauigkeiten des Radars zu untersuchen.

Mithilfe der SAR Technologie wird eine größere Antenne durch die Bewegung des Scanners entlang einer Geraden simuliert, wodurch die räumliche Auflösung parallel zum Gerät um ein Vielfaches maximiert werden kann. Bei dem verwendeten Model wird durch die Linearverschiebung der Radareinheit, welche mit zwei kompakten Antennen ausgestattet ist, eine zwei Meter große Antenne simuliert. Die Länge der simulierten Antenne bestimmt dabei die entfernungsabhängige Auflösung parallel zum Scanner. Die Größe der Pixel normal zum Radar wird durch die Spanne des verwendeten Frequenzbereichs festgelegt und ist entfernungsunabhängig. Bei dem in Vals zum Einsatz gekommenen Radar IBIS-FM der Firma IDS beträgt die Auflösung in 1000 m Entfernung 0,75 m x 4,4 m. Die Messungen erfolgen somit flächenhaft und stets für den gesamten definierten Messbereich. Die maximal mögliche Messfrequenz ist von der Dauer der Bewegung der Linearverschiebeeinheit abhängig und beträgt im vorliegenden Fall zwei bis drei Minuten. Die maximale Reichweite liegt bei 4 km und ist somit um ein Vielfaches größer als bei kompakteren Systemen wie dem IDS Hydra-G, dessen maximale Reichweite bei 800 m liegt.

Die zweite Technologie, die im Namen enthalten ist, ist die der Interferometrie und beschreibt die Messmethode zur Feststellung der Deformationen. Bei jeder Messung wird eine Welle ausgesandt, welche vom Objekt reflektiert und von der Antenne wieder empfangen wird. Abhängig von der Distanz zum Objekt weist die Welle eine andere Phasenambiguität auf. Durch den Vergleich dieser Phasenambiguitäten zwischen aufeinander folgenden Messzyklen kann mit Hilfe der Wellenlänge auf die Deformation zwischen den Messungen geschlossen werden.

Abbildung 9: Messung der Phasendifferenz (Quelle: IDS)



Diese Differenz ist jedoch nur innerhalb eines Wellenzyklus eindeutig, wodurch sich eine maximal messbare Deformation zwischen zwei Messungen ergibt. Deformationen die größer als ein Viertel der Wellenlänge sind, können nicht mehr richtig aufgelöst werden. Im Fall des verwendeten Geräts können die Deformationen maximal 4,4 mm zwischen zwei Messzyklen betragen, wodurch sich bei gleichförmiger Bewegung eine maximal messbare Geschwindigkeit von etwa 13 cm/h ergibt.

Da die Distanzänderung zwischen Messgerät und dem zu überwachenden Objekt erfasst wird, können Deformationen nur entlang der Sichtlinie des Radars gemessen werden. Bei einer Verformung von beispielsweise 8 mm in einem Winkel von $45,4^\circ$ zur Sichtlinie können 5,6 mm, also 70% der Bewegung, bei einer Verformung von 5 mm in einem Winkel von $24,6^\circ$ zur Sichtlinie können 4,5 mm, also 90% der Bewegung vom GBinSAR erfasst werden. In Abbildung 10 sind beide Beispiele anhand des Profils in Vals dargestellt.

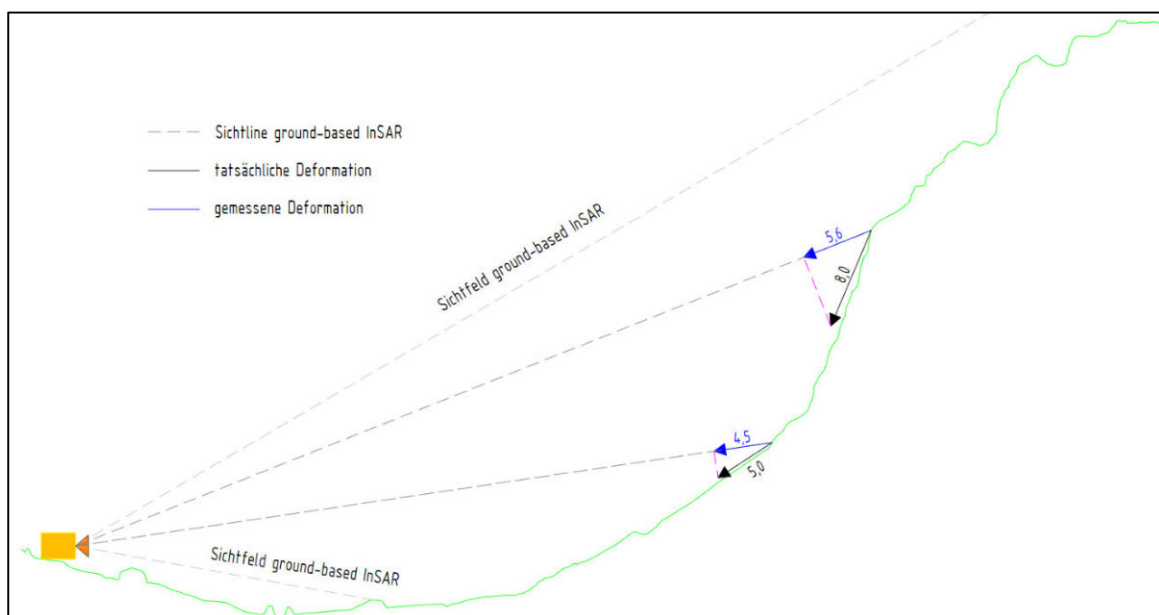


Abbildung 10: Profil und Sichtfeld GBinSAR in Vals (Bewegungsvektoren ohne Maßstab)

5. Installation und Georeferenzierung

Voraussetzungen zur Installation eines GBinSAR ist ein zuverlässiges GSM Netz sowie eine Stromversorgung am Aufstellungsort. Für den Fall, dass kein direkter Anschluss an das Stromnetz möglich ist, kann das System über eine Photovoltaikanlage mit Strom versorgt werden. Im gegenständlichen Fall war Netzstrom bereits für die früher installierten Messeinrichtungen vorhanden. Zur Montage wird ein Betonfundament im Ausmaß von 0,6 m (Höhe) x 0,6 m (Breite) x 2,2 m (Länge) benötigt. Zum Schutz des Geräts vor Niederschlag wurde eine halboffene Messhütte errichtet.

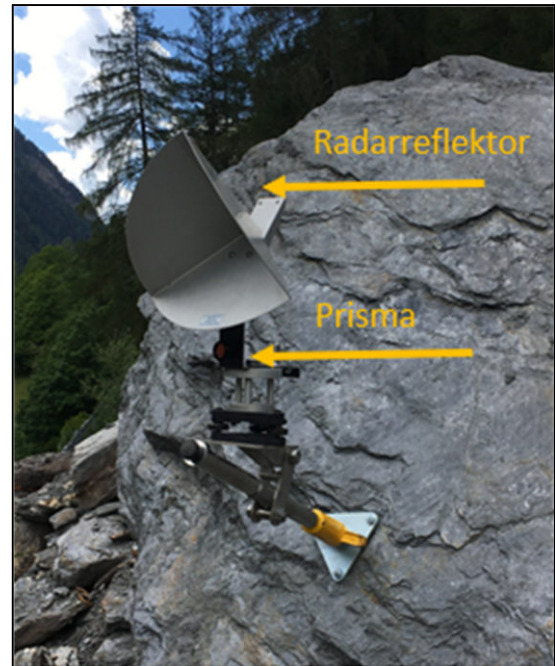


Abbildung 11: Linearverschiebeeinheit und Radarsensor

Vor der Installation des Radars vor Ort sollte außerdem ein Digitales Geländemodell (DGM) im Bereich des Überwachungsgebiets und des Sensorstandpunkts vorliegen. Ein DGM ist zwar nicht unbedingt erforderlich, doch vereinfacht es die Interpretation der gemessenen Deformationen enorm. So findet die Georeferenzierung im Raum ausschließlich durch die Projektion der Interferogramme auf das DGM statt, eine ungenaue Referenzierung führt zu systematischen Fehlern in den Verformungsdaten und kann so die Interpretation der Ergebnisse deutlich erschweren. In Vals konnte auf ein von der Abteilung Geoinformation des Landes Tirol zur Verfügung gestelltes DGM zurückgegriffen werden, dass aus einer Kombination von airborne- und terrestrischem Laserscan erstellt wurde.

Für die Georeferenzierung muss der Sensorstandpunkt sowie das Azimut der Sichtlinie des Radars und der eingestellte Vertikalwinkel bekannt sein. Für die genaue Bestimmung des Azimuts wurde von Trigonos ein Radarreflektor (Corner-cube Reflektor) mit integriertem Prisma konstruiert, welcher im Idealfall außerhalb der Massenbewegung installiert wird. (siehe Abbildung 12) Durch das Abgleichen der Position des Prismas mit den Pixeln, die aufgrund des Radarreflektors eine besonders hohe Signalstärke aufweisen, kann das korrekte Azimut bestimmt werden.

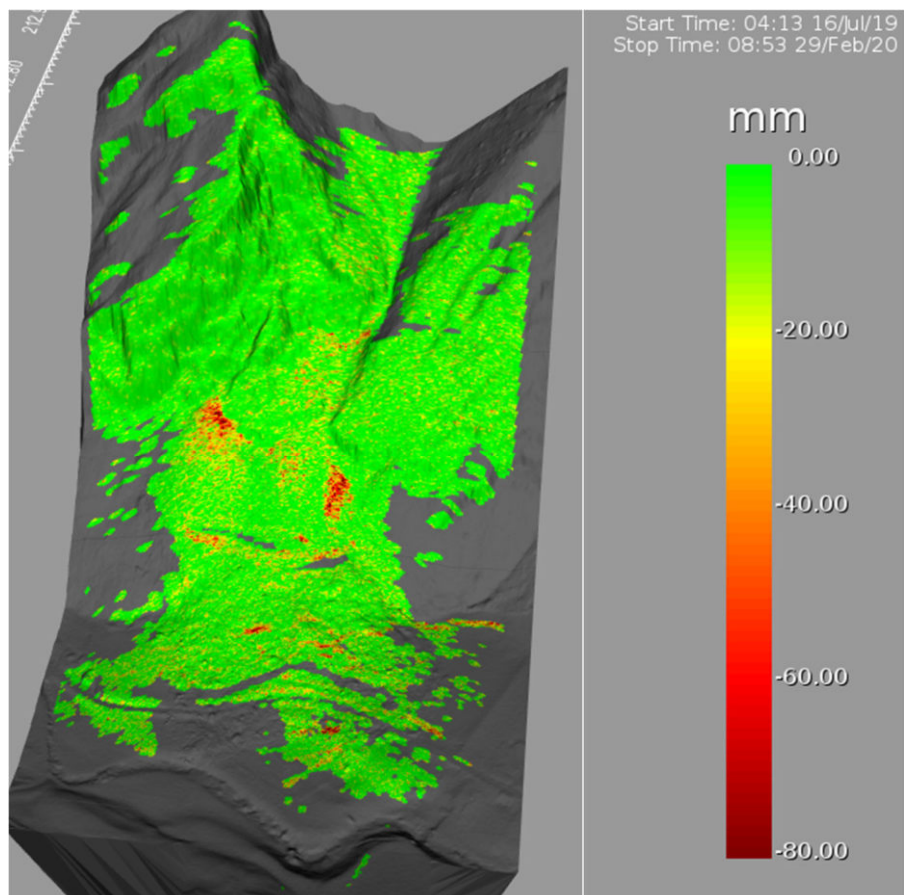
Abbildung 12: Corner-cube Reflektor mit integriertem Prisma zur Georeferenzierung



6. Ergebnisse

Als Ergebnis einer Radarmessung erhält man ein 2D-Raster dessen Pixel jeweils eine Streckendifferenz beinhalten. Nach jeder Messung wird ein Interferogramm erstellt, welches die Differenzen zur vorangegangenen Messung enthält. Um die Gesamtdeformation über einen längeren Zeitraum zu erhalten, werden die Streckendifferenzen der einzelnen Pixel aufsummiert.

Abbildung 13: Flächenhafte Darstellung der Verformung



In Abbildung 13 sind die aufsummierten Interferogramme vom 16. Juli 2019 bis zum 29. Februar 2020 auf das DGM projiziert dargestellt. In der Felswand sind keine signifikanten Bewegungen erkennbar, im Schuttkegel unterhalb sind Bewegungen bis etwa 80mm sichtbar.

Die Herstellerangabe von 0.1mm ist als theoretische Genauigkeit unter Laborbedingungen zu verstehen. Daher wurde unter anderem mittels eines Verschiebeversuchs überprüft, welche Genauigkeiten im praktischen Einsatz tatsächlich erreichbar sind. Für diesen Versuch wurde an zwei unterschiedlichen Positionen innerhalb des Sichtfelds des Radars der zuvor beschriebene Radarreflektor mit integriertem Messprisma installiert. Nun wurde jeweils der Reflektor samt Prisma entlang einer mit einer Millimeterskala versehenen Halterung schrittweise verschoben. Nach jedem Schritt erfolgte jeweils eine Messung mittels GBinSAR und Totalstation. Zu Beginn wurden jeweils 4 mm Schritte ausgeführt, um die vom Hersteller angegebene maximal messbare Deformation zwischen zwei Messzyklen zu überprüfen. Anschließend wurde die Schrittweite immer weiter bis auf 1mm reduziert.

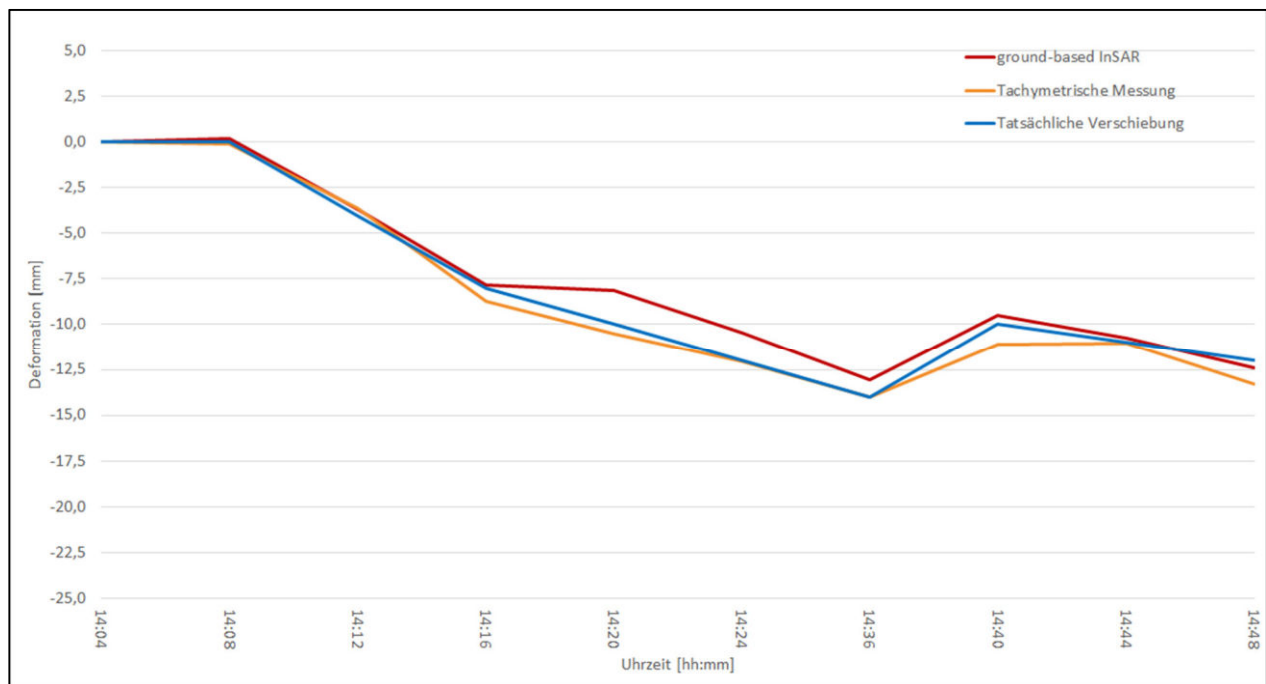


Abbildung 14: Ergebnis des Verschiebeversuchs am Punkt G1

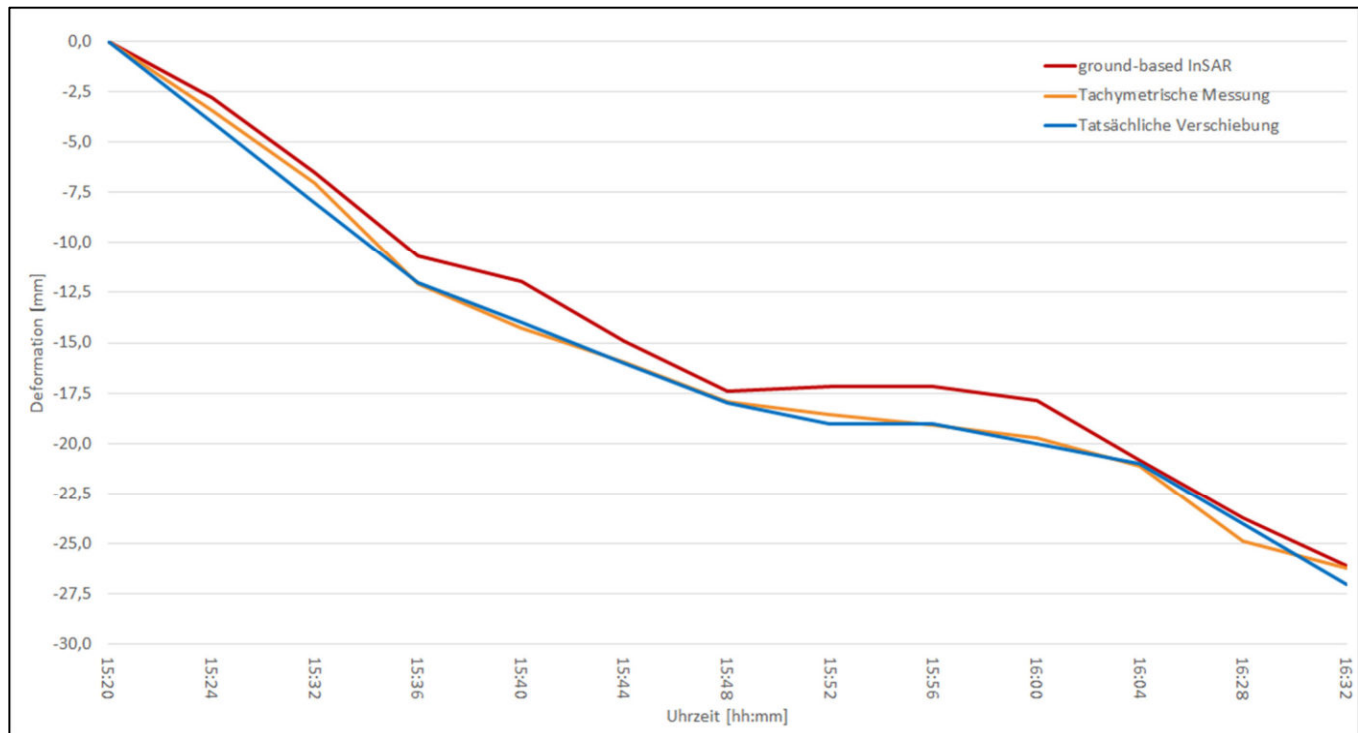


Abbildung 15: Ergebnis des Verschiebeversuchs am Punkt G2

An beiden Punkten bildet sich der durchgeführte Vershub, sowohl in den Messungen mittels ground-based InSAR als auch in jenen mittels Totalstation, weitestgehend ab. In Tabelle 1 finden sich die zugehörigen Standardabweichungen:

Punkt \ Messsystem	Ground-based InSAR	Tachymetrische Messung
G1	0,9 mm	0,7 mm
G2	1,4 mm	0,5 mm

Tabelle 1: Standardabweichungen des Verschiebeversuchs

Wird von einer Normalverteilung der Messwerte ausgegangen, so liegen 99,7 % aller Werte der Radarmessung um maximal $\pm 4,2$ mm (3σ) um den tatsächlichen Wert verteilt. Die Genauigkeit der tachymetrischen Streckenmessung beträgt 2 mm (3σ) bei einer Entfernung von etwa 420m.

Um die tatsächliche Deformation in einem Punkt zu analysieren, sind Zeit-Verformungsgraphiken die am weitesten verbreitete Darstellungsart. Auch ein effizientes Warnsystem benötigt als Grundlage Zeit-Verformungsgraphiken. Während bei einem tachymetrischen Monitoring der Messwert nur über die Zeit gemittelt werden kann, ist aufgrund der flächenhaften Messung des Radars auch eine Mittelung im Raum möglich. Wird ein einzelnes Pixel als Datengrundlage für die Zeit-Verformungskurve gewählt, enthält dieses zwar die gesamte Deformation an diesem Punkt, jedoch ist die Kurve stärker verrauscht. Wird eine Fläche,

um diese Pixel als Datengrundlage verwendet, schwächt sich das Rauschen der Kurve zwar ab, doch durch die etwas andere Deformation an den umliegenden Pixeln, geht die tatsächliche Deformation an genau diesem Pixel verloren. Je größer die Fläche, desto geringer das Rauschen, desto weniger stark geht die Deformation des einzelnen Pixels in die dargestellte Deformation der Kurve ein. Die beschriebene Systematik zeigt sich gut in Abbildung 16. Während die stark verrauschte rote Kurve die Deformation an einem einzelnen Pixel zeigt, wurde für die orange Kurve eine Fläche von 19m² und für die gelbe eine Fläche von 112m² um das Pixel gewählt. Das Abnehmen des Rauschens mit der Größe der Fläche ist klar erkennbar. Für ein möglichst gut funktionierendes Warnsystem ist es also von Vorteil möglichst größere Flächen zu finden, von denen anzunehmen ist, dass diese in sich gleichmäßig verformen. Die in Abbildung 16 dargestellten Deformationen wurden im Schuttkegel unterhalb der Felswand registriert.

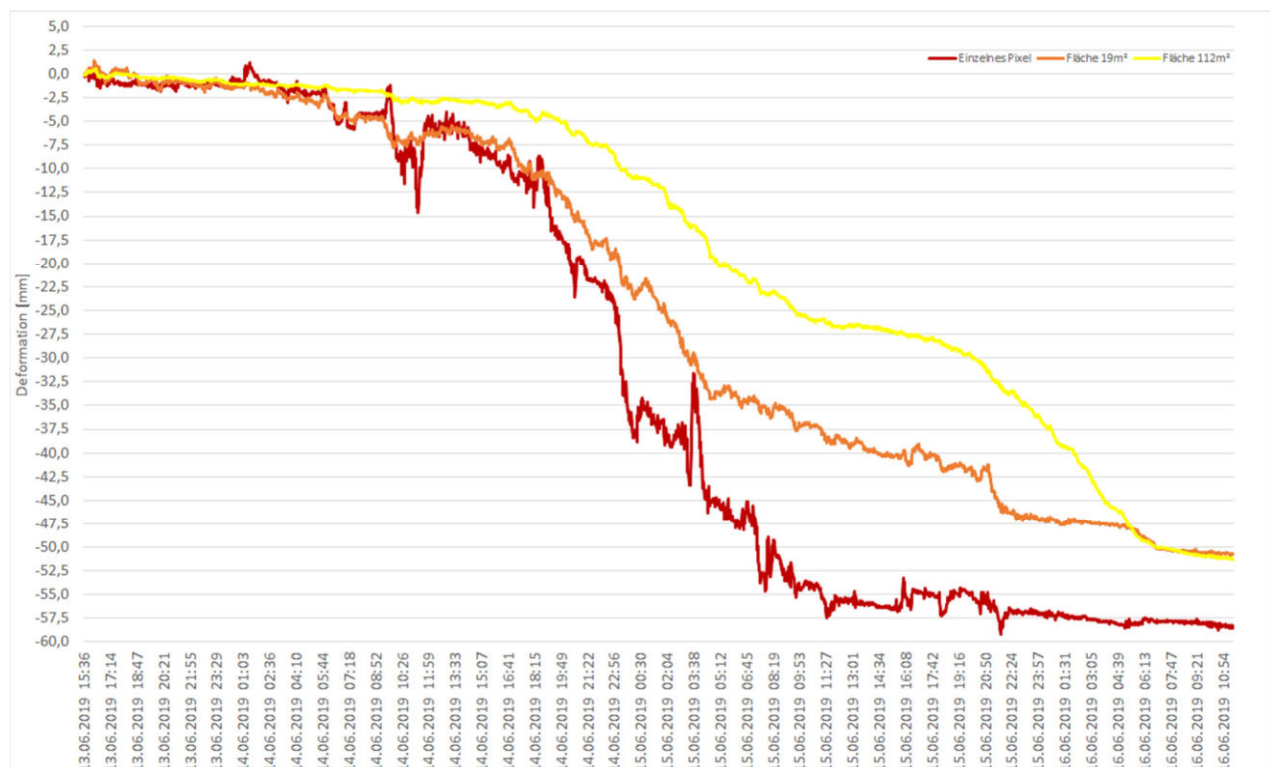


Abbildung 16: Vergleich gemessene Deformation an einem einzelnen Pixel und Flächen um dieses Pixel

7. Schlussfolgerung

Die Wahl der Messmethode beim Monitoring von Naturgefahren wird - nach der Grundsatzentscheidung ob Warn- oder Alarmsystem - auf Grundlage von den Parametern Genauigkeit, Ausdehnung, Zugänglichkeit, Verfügbarkeit und nicht zuletzt des Budgets getroffen. Die tachymetrische Messung hat sich aufgrund der hohen Genauigkeit von 3D-Verformungen von Einzelpunkten, der Flexibilität und raschen Installation sowie des einfachen Übergangs zwischen Dauermonitoring und nachlaufenden manuellen Messungen nicht nur in Vals bewährt. Gemeinsam mit der Sub-Millimeter Genauigkeit der Rissweitenmessung wurde somit die Datengrundlage für ein zuverlässiges Warnsystem und tieferes Prozessverständnis seitens der betreuenden geologischen Experten geschaffen.

Ein ground-based InSAR bietet die Möglichkeit einer vollflächigen Aufnahme und eine Installation ohne Betreten des Gefährdungsbereichs und ermöglicht im Unterschied zu einem terrestrischen Laserscanner die Verfügbarkeit von Daten unabhängig von äußeren Einflüssen wie Nebel, tiefliegenden Wolken, starken Regen- und Schneefall. Zu beachten ist, dass beim Radar nur Deformationen entlang der Sichtlinie festgestellt werden, d.h. im Unterschied zu einem Tachymeter keine vollständige 3D-Information gewonnen wird und für die Definition des Messintervalls die zu erwartende Verformungsgeschwindigkeit sorgfältig abzuwägen ist. Die Zuverlässigkeit sämtlicher verwendeter Systemkomponenten (Radar, Datenübertragung, Software, Stromversorgung) wurde unter realistischen Bedingungen nachgewiesen. Eine Genauigkeit von einigen wenigen Millimetern, bei günstigen Messbedingungen und Flächen homogener Bewegung auch genauer, ist erreichbar. Die Bandbreite der Datenübertragung ist auch bei durchschnittlicher GSM-Netzqualität ausreichend, so dass der Einsatz als Warnsystem mit Internet-Anbindung bei den in alpiner Umgebung weit verbreiteten 2- oder 3G Netzen möglich ist.

Eine Kombination des GBinSAR mit geotechnischen und geodätischen Messungen hat sich als sinnvoll herausgestellt, da die individuellen Stärken der einzelnen Messsysteme somit optimal genutzt werden können und unabhängige Verifikationen der Ergebnisse ermöglicht werden. Qualitativ hochwertige Geobasisdaten, wie z.B. digitale Geländemodelle auf Grundlage von Laserscan oder Photogrammetrie, sind dabei als Fundament für Messungen verschiedenster Art wichtiger denn je.

8. Danksagung

Die Durchführung des Testprojekts mit ground-based InSAR erfolgte mit Unterstützung der Abteilungen Geoinformation, sowie Verkehr und Straße des Amts der Tiroler Landesregierung.

9. Referenzen

1. Fritzmann P., Anegg J., Heißel G., Nittel-Gärtner P., Huber W., Leuthold M., Plank J., Riedl F. (2018): Felssturz Vals – ein Weihnachtswunder. 20. Geoforum Umhausen Tirol
2. Mölk M., Sausgruber T., Rieder B. (2020): Bergsturz Vals 2017: Eine Beinahe-Katastrophe – und der Umgang mit den Gefährdungspotentialen danach, unveröffentlichter Bericht der WLV
3. Trigonos ZT GmbH (2018-2020): Monitoring Felssturz Vals, Monats- und Jahresberichte i. A. der WLV und des Amts der Tiroler Landesregierung