

# Einsatz von Radarmethoden im Geomonitoring der Schweiz

URS WEGMÜLLER, RAFAEL CADUFF & TAZIO STROZZI

Der Einsatz von Radarfernerkundungsmethoden hat sich in der Schweiz in den letzten Jahren als nützliches Werkzeug für die Detektion, die Beurteilung und die Kontrolle gravitativer Naturgefahren etabliert. In diesem Beitrag werden die Entwicklungsgeschichte und heutigen Einsatzbereiche von satelliten- und bodengestützten Radarmethoden vorgestellt.

## 1. Einleitung

In der Schweiz umfasst der Einsatz von Radarmethoden im Geomonitoring mehrere Anwendungsbereiche:

- Naturgefahren (insbesondere Rutschungen, Felsstürze, Bergstürze)
- Infrastruktur / Baugeologie (Grossbaustellen, Bauen in Rutschgebieten, Tunnelbau, Massnahmenplanung bei Naturgefahren)
- Verschiedenes (Senkungen z.B. bei Salzgewinnung, Karstgebiete, Stabilität von Infrastruktur, ...)

Anwendungen im Zusammenhang mit Naturgefahren sind dabei der eindeutig wichtigste Anwendungsbereich. Massenbewegungen sind ein Risiko für Mensch, Infrastruktur und Umwelt, dies insbesondere in alpinem Gelände, wie es in einem grossen Teil der Schweiz vorhanden ist. Im Jahr 2000 wurden in der Schweiz für den Schutz vor allgemeinen Naturgefahren (inkl. Lawinen- und Wassergefahren) mindestens 2.5 Milliarden Franken pro Jahr aufgewendet. 56 Prozent dieser Kosten wurden von Privatpersonen getragen, darin enthalten ist ein Anteil der Naturgefahrenversicherung von 33 Prozent. 15 Prozent der Kosten wurden vom Bund, 13 Prozent von den Kantonen und 16 Prozent von den Gemeinden getragen. Das für die Prävention verwendete Budget betrug 1 Milliarde Franken.

Das folgende Kapitel enthält eine kurze Entwicklungsgeschichte für den Einsatz von Radarmethoden im Zusammenhang mit Naturgefahren in der Schweiz. Anschliessend beschreiben wir Verantwortlichkeiten und Vorgehensweisen im Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz und stellen verschiedene Anwendungsbereiche ausgewählter Radarmethoden vor.

## 2. Entwicklungsgeschichte

Wenn wir hier einige mehrheitlich technologische Entwicklungsschritte zum Einsatz von Radarmethoden im Zusammenhang mit gravitativen Naturgefahren auflisten, so geschieht dies aus unserer eigenen, „radargeprägten“ Sicht; ebenfalls waren wir selber Teil dieser Entwicklung, womit diese Aufzeichnung nicht neutral oder ausgewogen ist.

Die SAR Interferometrie Methode wurde zu wesentlichen Teilen zwischen dem Start des ESA Satelliten ERS-1 1991 und der Gründung unserer kleinen schweizerischen Firma Gamma Remote Sensing (GAMMA), 1995, entwickelt. Charles Werner und Urs Wegmüller, die Gründer von Gamma Remote Sensing waren im Rahmen ihrer damaligen Anstellungen an dieser Entwicklung mitbeteiligt. Bereits 1995 verkaufte GAMMA erste Lizenzen für eine erste Version ihrer SAR/InSAR Software.

Ab 1998 engagierte sich GAMMA dann auch zunehmend in der Anwendungen von Differenzieller SAR Interferometrie (DInSAR), z.B. im Rahmen von ESA Projekten. Dies nicht zuletzt wegen dem faszinierenden Potential, Verschiebungen in der Grössenordnung von einem Zentimeter mittels Satelliten aus 800 km Distanz zu bestimmen und damit interessante Anwendungsbereiche wie Erdbeben, Bodenabsenkungen oder Rutschungen zu erschliessen.

Durch die Verwendung mehrerer interferometrischer Paare gelang es uns ab 1999 mittels „Stacking“ von mehreren Einzelbeobachtungen auch langsame Deformationsraten im Bereich von wenigen Millimetern pro Jahr zuverlässig zu bestimmen und Resultate bei verschiedenen Deformationsraten mit unabhängigen Methoden zu validieren.

Ab 2002 beschäftigten wir uns vertiefter mit der Hangrutschungsthematik mehrheitlich in der Schweiz. Dabei arbeiteten wir meistens mit Schweizer Fachleuten aus dem Naturgefahrenbereich (Geologie-/Ingenieurbüros, verantwortliche Stellen bei Bund und Kantonen, Forschende an Hochschulen) zusammen.

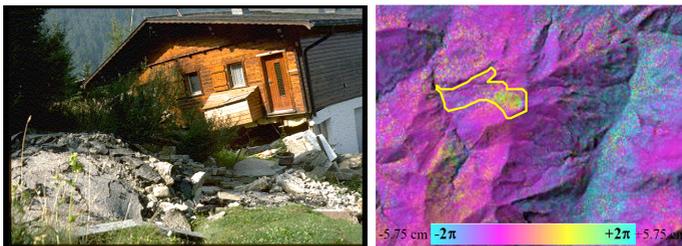
Ein wichtiger Entwicklungsschritt bei den verwendeten Auswertmethoden war dann die Implementierung von systematischen Methoden der Auswertung von Zeitreihen für ausgewählte speziell geeignete Radar-Rückstreuer, welche das vom Sensor aktiv gesendete Signal an diesen zurückreflektieren, sogenannte „Persistent Scatterer“, für welche die Kohärenz des zurück gestreuten Signals über eine sehr lange Zeit auf einem hohen Niveau erhalten bleibt. Ab 2003 verwendeten wir „Persistent Scatterer Interferometrie“ (PSI) und unterstützten andere darin mit der Interferometric Point Target Analysis (IPTA) Software. In den folgenden Jahren gab es weitere technische Entwicklungen (Software, Satelliten) und weitere Projekte, einige davon in Naturgefahrenbereich. Unter Verwendung der ERS und ENVISAT Satellitendaten wurde in der Schweiz begonnen grossflächige PSI basierte Geländeverschiebungskarten zu generieren. Diese wurden dann von den Kantonen, oder den von den Kantonen beauftragten Ingenieurbüros, als eine der verwendeten Informationsquellen bei die Erstellung von Gefahrenkarten verwendet. Lokale PSI Auswertungen und differentielle Interferogramme wurden für die detailliertere Beurteilung von gravitativen Prozessen mit berücksichtigt.

Einschränkungen der Anwendbarkeit von satellitenbasierten Radarmethoden im Krisenfall, unter anderem auch wegen dem stark limitierenden Aufnahmezyklus von 35 Tagen (ERS, ENVISAT), aber auch wegen ungeeigneter Beobachtungsgeometrie und Verzögerungen

mit dem Zugriff auf neue Aufnahmen zum einen, als auch ermutigende Resultate welche in Italien mit einem bodengestützten SAR (Synthetic Aperture Radar) erzielt wurden, motivierten uns ein terrestrisches interferometrisches Radar zu entwickeln. Ab 2007 entwickelten wir das Gamma Portable Radar Interferometer (GPRI), ein terrestrisches Radar im Ku-Band mit realer Apertur und ab 2008 führten wir erste GPRI Messungen durch. Eine reale Apertur wurde wegen praktischen Gründen und der hohen erreichbaren Signalqualität gewählt. Von einem Aufnahmestandort aus kann durch Rotation des Radars ein sehr grosser Winkelbereich erfasst werden. Eine erneutes Aufstellen des Geräts zu einem späteren Zeitpunkt am exakt gleichen Standort, wie dies für die Bestimmung von langsamen Verschiebungen verwendet wird, ist problemlos möglich.

Während anfangs die meisten Arbeiten im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten durchgeführt wurden, kamen ab 2010 auch vermehrt kommerzielle Aufträge für Satellitendatenauswertungen und GPRI Messungen dazu. Der Bekanntheitsgrad der Methoden und die Nutzerbasis weiteten sich aus. Mittlerweile werden in der Schweiz im Naturgefahrenbereich Radarmethoden regelmässig in Betracht gezogen und eingesetzt durch Behörden, Infrastrukturbetreiber und Geologie- und Ingenieurbüros.

Parallel mit der Technologie, deren Anwendung und deren Bekanntheitsgrad hat sich auch die Akzeptanz der Methode entwickelt. Die bereits durchlaufenen Phasen der Akzeptanz sind in Tabelle 1 aufgelistet. Dabei steht weniger die regulatorische Akzeptanz sondern die Akzeptanz in der Praxis im Vordergrund. Interessant war dabei auch die Beobachtung, dass nicht so sehr die quantitative Genauigkeit der Methode der wesentlichste Aspekt war, sondern der qualitative Mehrwert an Information welcher erzielt werden konnte. So konnten zum Beispiel für das Rutschungsereignis, mit welchem in der jüngsten Zeit die schwerwiegendsten Zerstörungen einhergegangen sind, nachträglich Fragen zur Vorgeschichte der Rutschung beantwortet werden. In Falli Hölli, Kanton Freiburg, rutschten 1994 rund vierzig Häuser und ein Hotel mit 6 Metern pro Tag Richtung Höllbach und erlitten einen Totalschaden (RAETZO 1997). Mittels 1993 aufgenommenener JERS SAR Daten konnte zuverlässig festgestellt werden, dass bereits mehrere Monate vor dem zerstörerischen Ereignis starke Bewegungen, mit Raten im cm/Monat bis dm/Monat, stattgefunden haben (Abbildung 1).



**Abbildung 1:** 1994 durch die Falli Hölli Rutschung zerstörtes Haus (links) und JERS differentielles Interferogramm (rechts, 19930619-19930915), welches für den oberen Bereich der Rutschung (gelbe Linie), klar erkennbar, eine erhöhte Verschiebungsrate anzeigt.

Tabelle 1: Phasen der Akzeptanz der Radarmethoden

- i. Wenig eigene Erfahrung, wenige Beispiele, nur einige Forscher brauchen die Methode; wir waren froh, wenn ein potentieller Nutzer bereit war, seinen Umgang mit gravitativen Naturgefahren zu beschreiben und sich ein Radarresultat anzuschauen.
- ii. Einige Beispiele, darunter einige überzeugende Beispiele (bekannte Phänomene in Radarresultaten werden wiedererkannt; zusätzliche Information ist plausible oder wird bestätigt).
- iii. Einige Nutzer sind vom (Mehr-)Wert der radarbasierten Information überzeugt.
- iv. Weitere Nutzer, mehr Beispiele, breitere zur Kenntnisnahme der Methode; Erwähnung und Empfehlung der Methode in relevanten Berichten.
- v. Radarmethode wird als akzeptierte Methode eingesetzt und als Problemlöser geschätzt.

### 3. Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz

Die im folgenden zusammengetragene Information stützt sich im Wesentlichen auf einen Bericht der Plattform Naturgefahren PLANAT (2004, „Strategie\_Naturgefahren\_Schweiz“) und drei Berichte der Bundesbehörden (2015, „Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz“, 2016, „Schutz vor Massenbewegungsgefahren“, 2018 „Optimierung von Warnung und Alarmierung vor Naturgefahren (OWARNA“).

#### 3.1. Verantwortlichkeiten

Im Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz verteilen sich die Verantwortlichkeiten auf Behörden (Bund, Kantone, Gemeinden), Infrastruktur Besitzer und Betreiber, sowie Versicherungen. Die Behörden sind für Gesetzliches und den Schutz der Bevölkerung zuständig. Nebst baulichen Schutzmassnahmen sind dabei Gefahrenkarten, Zonenpläne und Risikobeurteilungen wichtige Werkzeuge. Infrastruktur Besitzer und Betreiber sind für den Schutz der Infrastruktur und deren Benutzer verantwortlich. Und Versicherungen für das Abdecken von finanzielle Schäden. Dabei gilt bei der Umsetzung vom Naturgefahrenmanagement weitestgehend ein Solidaritätsprinzip zwischen den involvierten Stellen. Sowohl bei der Planung, wie auch bei der Finanzierung von Massnahmen sind sehr oft Behörden auf verschiedenen Stufen (Bund, Kantone, Gemeinden) beteiligt.

#### 3.2. Vorgehen

Die Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren (BAFU 2016) übernimmt soweit möglich anerkannte Grundsätze und präzisiert bestimmte Anforderungen. Das allgemeine Vorgehen ist in Abbildung 2 skizziert.

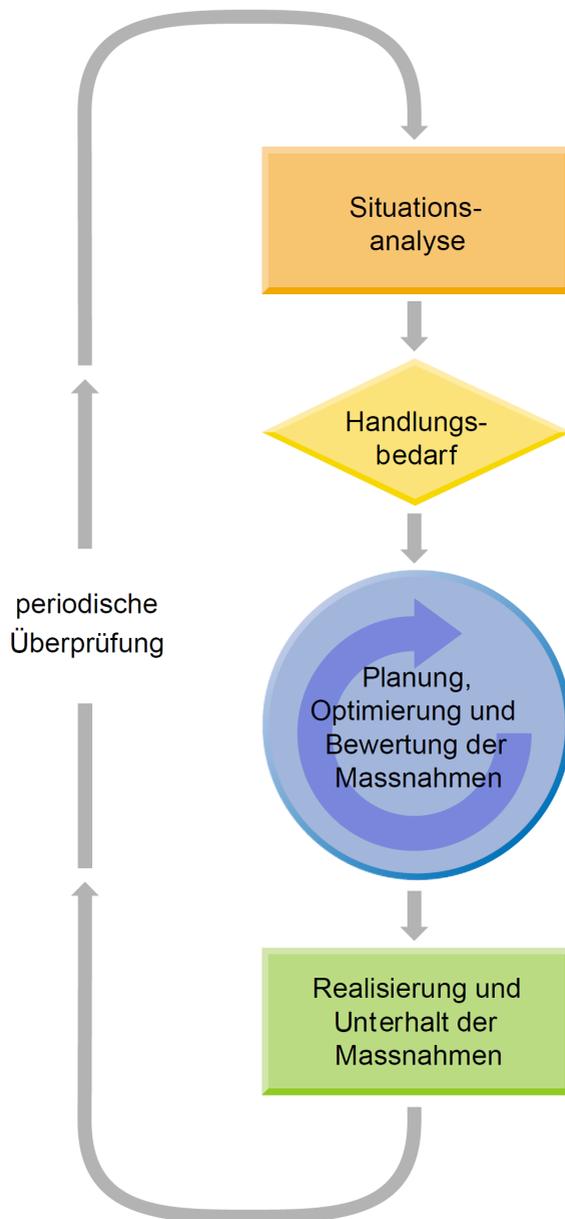


Abbildung 2: Vorgehen beim Management von Naturgefahren (aus BAFU 2016)

Die Situationsanalyse umfasst das Erstellen und Verwalten von räumlicher Information zur Gefahrensituation mittels:

- Gefahrenhinweiskarten (flächendeckend, vorhanden), dazu gehören auch die detaillierten Karten zu Rutsch- und Fallprozessen (Ereigniskataster, diese sind aber heterogen und unvollständig).
- Gefahren- und Intensitätskarten (für Siedlungsgebiet und Verkehrswege, nahezu vollständig vorhanden)
- Lokale, fallspezifische Risikoanalysen, welche das Gefahrenpotenzial mit dem Schadenspotential integriert.

Ebenfalls Teil der Situationsanalyse sind Vorbereitungsmaßnahmen für Krisensituationen, Information zur Raumnutzung (als Input zur Risikoanalyse).

Basierend auf der Situationsanalyse stellen dann die verantwortlichen Stellen, unterstützt von Fachleuten, den Handlungsbedarf fest. Nebst dem Gefahrenpotential spielt dabei das Schadenpotential, also der betroffene Wert, eine wichtige Rolle.

Anschliessend werden mögliche Massnahmen ausgearbeitet, bewertet und optimiert. Die wichtigsten Massnahmen um Risiken zu Vermeiden oder Reduzieren umfassen:

- Raumplanung
- Strukturelle und technische Schutzmassnahmen (Drainage, Dämme, Verankerungen)
- Vorbereitungsmaßnahmen für Krisensituationen

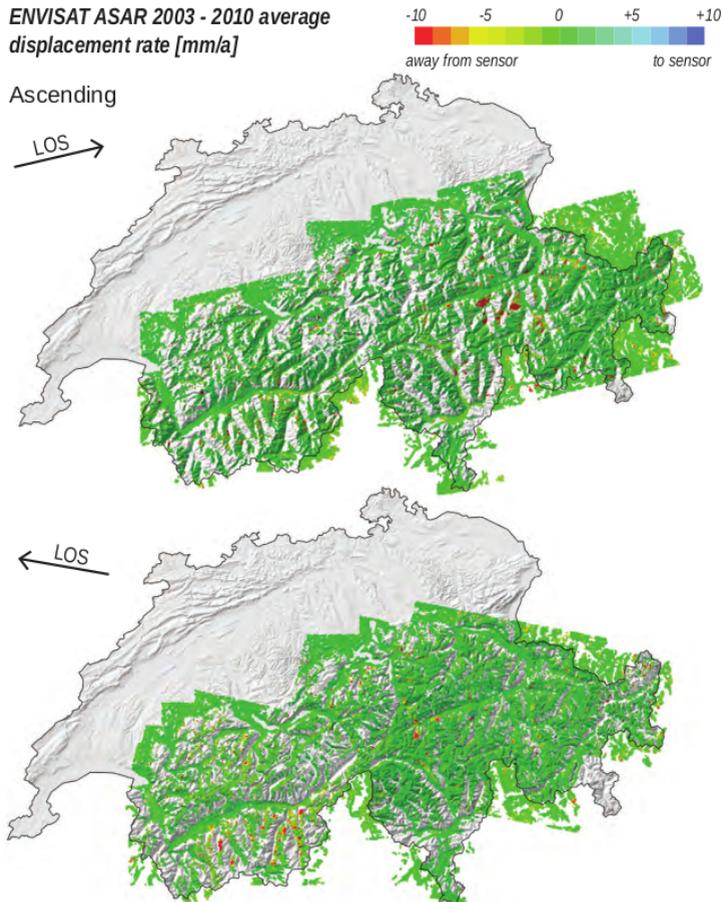
Die Gefahrensituation, umgesetzte Massnahmen, aber auch neue Werte welche bedroht werden verändern sich mit der Zeit. Ein Temperaturanstieg und Veränderungen von Niederschlagsmengen, -form, und zeitlicher Verteilung verändern die Gefahrensituation ebenfalls. Es ist deshalb notwendig, dass die verschiedenen Schritte des Naturgefahrenmanagements periodisch überprüft und aktualisiert werden.

#### **4. Verwendung von Radarmethoden im Umgang mit Naturgefahren**

Radarmethoden können das Naturgefahrenmanagement in verschiedenen Phase unterstützen. In der Situationsanalyse kann das Erstellen und Aktualisieren der räumlichen Information zur Gefahrensituation unterstützt werden durch Information zur Lage, Aktivität und zeitlichen Entwicklung von Geländeinstabilitäten. In einer Krisensituation sind satelliten- und bodengestützte Radarmessungen Werkzeuge, welche zur Erfassung der Hang- oder Felsinstabilitäten und deren zeitlichen Entwicklung eingesetzt werden können. Bessere Grundlageninformation trägt zu einem besseren Verständnis des gravitativen Prozesses bei, was im Zeitraum vor / während einem Krisenfall gezieltere Schutzmassnahmen erlaubt. Bei technischen Massnahmen, welche eine Stabilisierung einer Hangpartie zum Ziel haben, können Radarmethoden vor- und nach einer baulichen Massnahme verwendet werden um den Erfolg zu überprüfen.

Im Folgenden stellen wir einige radarbasierte Methoden und deren Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der gravitativen Naturgefahren vor.

- i. Grossflächige Karte der Deformationsrate aus historischen Satelliten SAR Datenstacks (mittels PSI)
  - Input zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten und Gefahren- und Intensitätskarten (Rutschkörper Umriss und Aktivität)
  - Beitrag zur Raumplanung



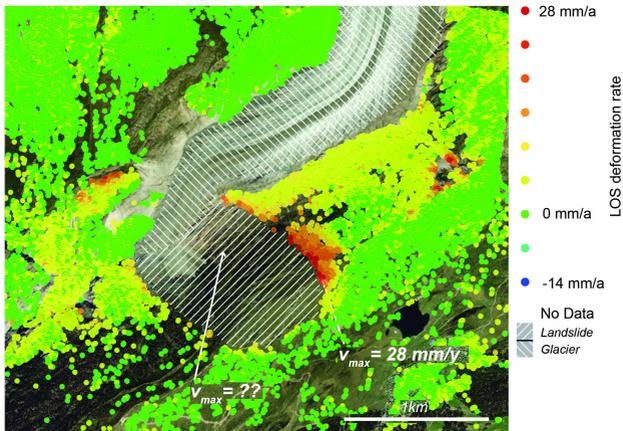
**Abbildung 3:** Mittlere Deformationsrate in der Radarblickrichtung (LOS) für den Zeitraum 2003 – 2010, über den Schweizer Alpen, bestimmt aus ENVISAT ASAR Daten, welche in ascending (oben) und descending (unten) Orbits aufgenommen wurden.

Abbildung 3 zeigt die mittlere Deformationsrate für den Zeitraum 2003 – 2010 für die Schweizer Alpen.

ii. Lokale Karte der Deformationsrate und Deformationszeitreihen aus historischen Satelliten SAR Datenstapel (mittels PSI)

- Input zur Erstellung von detaillierten Karten zu Rutsch- und Fallprozessen (Umriss, Aktivität, Dynamik, Prozessverständnis)
- Beitrag zur Raumplanung, Planung von Schutzmassnahmen, Vorbereitung von Krisensituationen
- Beitrag zum Risikomanagement eines Infrastrukturbetreibers

Abbildung 4 zeigt eine lokale Karte der mittleren Deformationsrate welche für die Moosfluh Rutschung aus TerraSAR-X Daten bestimmt wurde.

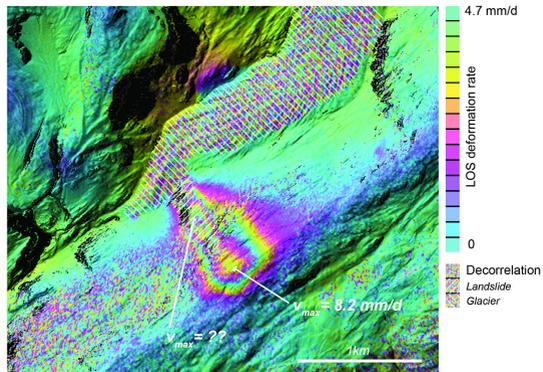


**Abbildung 4:** TerraSAR-X basierte lokale Karte der mittels PSI bestimmten Deformationsrate in der Radarblickrichtung für das Gebiet der Moosfluh Rutschung südlich vom Zungenbereich des Grossen Aletschglatschers (Kanton Wallis, Schweiz). Deformationsraten  $\gg 3$  cm/Jahr wurden nicht erfasst.

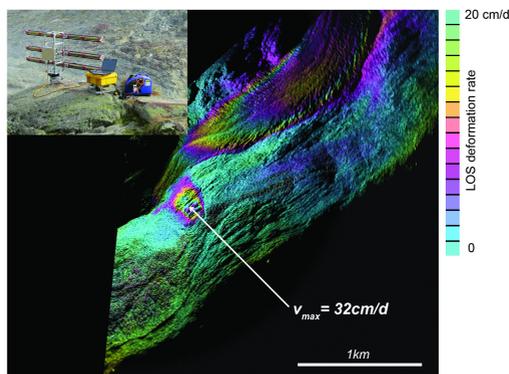
iii. Deformationsmonitoring mit aktuellen Satelliten SAR Datenstapel (lokal / Prozessskala) mittels PSI oder DInSAR

- als Vorbereitungsmaßnahme von Krisensituationen
- während Krisensituationen
- begleitend zur Umsetzung von Schutzmassnahmen
- bei schnellen und/oder nicht gleichmässigen Bewegungen

Abbildung 5 zeigt ein Sentinel-1 differentielles Interferogramm für einen 12-Tage Zeitraum. Störende atmosphärische Phasenverzögerungseffekte konnten lokal reduziert werden, durch die Annahme, dass das Gebiet ausserhalb der erkannten Rutschung stabil ist. Durch die Verwendung von Datenpaaren mit kurzen Zeitintervallen können auch schnelle Bewegungen erfasst werden. Das gezeigte differentielle Interferogramm enthält noch die komplexen Werte, die Phase wurde also nicht abgewickelt („unwrapped“). Trotzdem können die Werte recht gut auch quantitative interpretiert werden.



**Abbildung 5:** Sentinel-1 differentielles Interferogramm mit 12 Tagen Zeitintervall für das Gebiet der Moosfluh Rutschung südlich vom Zungenbereich des Grossen Aletschgletschers (Kanton Wallis, Schweiz). Auch schnelle Deformationsraten, bis ca. 8.2 mm/Tag ( 3m/Jahr) werden erfasst.



**Abbildung 6:** Mittels terrestrischer Radarmessungen (GPRI) bestimmte Deformationskarte für das Gebiet der Moosfluh Rutschung südlich vom Zungenbereich des Grossen Aletschgletschers (Kanton Wallis, Schweiz). Deformationsraten bis zu 32 cm/Tag wurden erfasst.

#### iv. Deformationsmonitoring mittels terrestrischer Radarmessungen

- Erfassen und/oder Überwachung von schnellen Gelände- oder Infrastrukturbewegungen (mm/Tag – m/Tag)
- Ergänzung / Alternative zu 3) (z.B. um mehrere Komponenten der Bewegung zu Messen oder um einen direkteren Zugang zur Information zu haben).
- Beitrag zum Risikomanagement eines Infrastrukturbetreibers
- Als Komponente von einem Alarmsystem

Abbildung 6 zeigt eine lokale Karte der mittleren Deformationsrate, welche für die Moosfluh Rutschung aus terrestrischen Radarmessung bestimmt wurde.

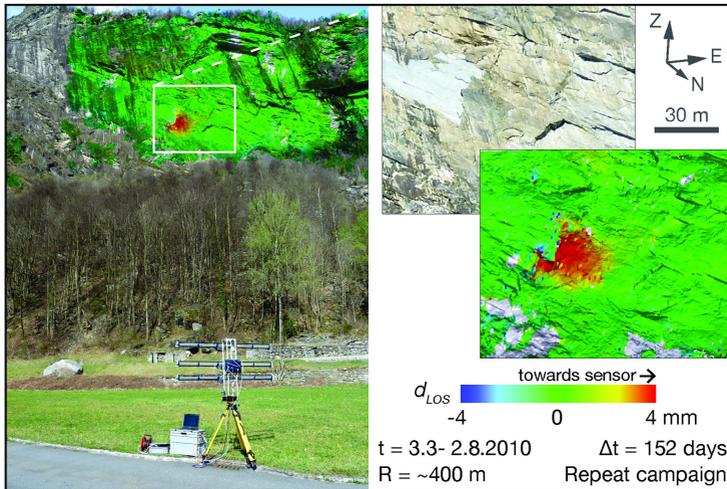
#### v. Terrestrische Radarmessungen (GPRI Kampagnen)

- Erfassen von langsamen Felsbewegungen (z.B. oberhalb von Dorf, Bahn, Strasse, See)
- Ergänzung / Alternative zu 2) (z.B. für Bewegungen in N-S Richtung)
- Beitrag zum Risikomanagement eines Infrastrukturbetreibers

Abbildung 7 zeigt eine lokale Karte, welche für eine Felswand mittels GPRI im Kampagnenmodus bestimmt wurde. Um diese langsame Bewegung ( $< 1$  cm/Jahr) zu erfassen wurde der Standort an 2 Tagen mit 152 Tage Zeitintervall dazwischen besucht und terrestrische Radarmessungen durchgeführt. In der Regel wird für solche Fälle 1-2 mal pro Jahr, bei Bedarf in kürzeren Intervallen eine Messkampagne durchgeführt.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In der Schweiz werden fernerkundliche geomonitoring Radarmethoden vor allem im Zusammenhang mit gravitativen Naturgefahren eingesetzt. Je nach Einsatzbereich und Fragestellung kommen dabei verschiedene Methoden zur Anwendung. Wesentliche Stärken der satellitenbasierten Methoden sind die relativ kostengünstige flächenhafte Erfassung der Deformationsrate und die Verfügbarkeit geeigneter Datenarchive zurück bis 1991. Die gegenwärtig betriebenen und geplanten SAR Satelliten stellen zudem nicht nur die Anwendbarkeit der Methode für die nächsten Jahre sichern sondern erlauben sogar eine Ausweitung der Anwendungen erlauben.



**Abbildung 7:** Mittels terrestrischer Radarmessungen (GPRI) im Kampagnenmodus (mit 152 Tage Zeitabstand zwischen den beiden Kampagnen) für eine Felswand bestimmte Deformationskarte. Ein Teil der Felswand (rotes Gebiet) bewegt sich mit etwa 4mm/Jahr auf den Radarstandort zu. Dieses Gebiet ist zu steil für eine Erfassung der Deformation mittels Satellitendaten.

## Literatur

BAFU (2016): Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern (<https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/45043.pdf>)

BAFU (2016): Schutz vor Massenbewegungsgefahren, Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/publikationen-studien/publikationen/schutz-vor-massenbewegungsgefahren.html>).

BAFU (2020): Gefahrenkarten, Intensitätskarten und Gefahrenhinweiskarten (siehe <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahrgrundlagen/gefahrenkarten-intensitaetskarten-und-gefahrenhinweiskarten.html>).

PLANAT (2004): Strategie Naturgefahren Schweiz (Plattform Naturgefahren, PLANAT, [http://www.sgww.ch/wp-content/uploads/dossier\\_22\\_planat.pdf](http://www.sgww.ch/wp-content/uploads/dossier_22_planat.pdf)).

PLANAT (2018): Umgang mit Risiken aus Naturgefahren. Strategie 2018. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Bern (<http://www.planat.ch/de/strategie2018/>).

RAETZO, H. (1997): Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung. Arbeitsbericht NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 256 S.

## **Verdankungen**

Diese Arbeit wurde durch das Eurostars Projekt E!113220 RAMON unterstützt (EUREKA, mitfinanziert von Innosuisse). Es wurden Sentinel-1 Daten von ESA/Copernicus verwendet. Es wurden ebenfalls JERS (JAXA), TerraSAR-X (Airbus), und ENVISAT (ESA) Daten verwendet.

## **Kontakt**

URS WEGMÜLLER

RAFAEL CADUFF

TAZIO STROZZI

Gamma Remote Sensing AG  
Worbstr. 225  
CH-3073 Gümligen  
Switzerland  
[www.gamma-rs.ch](http://www.gamma-rs.ch)