

Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 18 (2013)

Heft: 2

Artikel: Verschiebungsmessungen mittels Satellitenradar im Urner Reusstal oberhalb der Nord-Süd-Verkehrsachse im Zeitraum 1992 - 2010

Autor: Wegmüller, Urs / Strozzi, Tazio / Gruner, Ueli

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-391153>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

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

Verschiebungsmessungen mittels Satellitenradar im Urner Reusstal oberhalb der Nord-Süd-Verkehrsachse im Zeitraum 1992 – 2010

Urs Wegmüller¹, Tazio Strozzi¹, Ueli Gruner², Christian Gisler³, Marc Hauser⁴

Stichworte: Satellitenradar, Verschiebungsmessungen, Felssturz, Frühwarnsystem

Zusammenfassung

In einem Pilotversuch wurden im Urner Reusstal zwischen Sisikon und Wassen satellitengestützte Verschiebungsmessungen der Erdoberfläche durchgeführt. Das hauptsächliche Augenmerk wurde auf das Gebiet der Chli Windgällen gelegt. Dort werden seit rund 50 Jahren sehr aufwändige geodätischen Messungen gemacht.

Mittels interferometrischer Zeitreihenauswertung von 82 Aufnahmen der ERS- und ENVISAT-Satelliten im Zeitraum zwischen 1992 und 2010 wurden Geländeverschiebungsraten bestimmt und geologisch interpretiert. Die Methode erlaubt – ohne vorgängig Messpunkte zu setzen – eine grossräumige, flächenhafte Erfassung der Geländebewegungen mit einer Messgenauigkeit für lineare Bewegungen von etwa 1 mm/Jahr und einer räumlichen Auflösung von rund 20 m. Eingeschränkt wird die räumliche Abdeckung infolge zeitlicher Dekorrelation der Radarsignale durch Vegetation und durch radarspezifische Abbildungseffekte im Bereich steiler Hänge.

Die Methode eignet sich sehr gut für eine retrospektive Bestimmung von grossräumigen Geländebewegungen. Damit kann man mit geringem Aufwand einerseits langjährige, vergangene Bewegungsentwicklungen erkennen, andererseits mit einer neuen Satellitengeneration real-time Bewegungen erfassen. Diese Kombination ermöglicht es, diese Methode als neues und effizientes Instrument in der Früherkennung von Naturgefahren einzusetzen.

Abstract

In a pilot project SAR interferometry was used to determine ground displacement measurements in the upper Reuss valley (Switzerland) between Sisikon and Wassen, with a special focus on the area of the Chli Windgällen. In an interferometric time series analysis on 82 acquisitions of the ERS and ENVISAT satellites between 1992 and 2010 terrain displacements were determined and used as input to geological interpretation. The method works without installation of measurement points and achieves for linear movements a precision of about 1 mm/year at a spatial resolution of about 20 m. The spatial coverage is limited by temporal decorrelation of the radar signals by vegetation and by radar specific imaging effects on steep slopes.

The method can perfectly be used for the identification of large deformation areas and to monitor past and current movements, permitting to use it as an efficient component of an early warning system.

1 Einleitung

Anfangs der 1930er Jahre hat man begonnen, grossräumige Felsbewegungen in der Westflanke der Chli Windgällen bei Silenen mittels geodätischer Vermessungen zu überwachen. Da bei grösseren Sturzereignissen auch die Gotthard-Linie der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) gefährdet war, wurden die Vermessungen im Auftrag der SBB durchgeführt. 1936 ereignete sich in diesem Gebiet ein grosser Felssturz mit einem Sturzvolumen von 450'000 bis 500'000 m³, der aber kein bewohntes Gebiet erreichte. Seit Ende der 1960er Jahre wird die Westflanke etwa alle zehn Jahre durch so genannte Grosstriangulationen vermessen, was jeweils sehr hohe Kosten verursacht. Seit

¹ Gamma Remote Sensing AG, Worbstrasse 225, CH-3073 Gümligen [wegmuller@gamma-rs.ch]

² Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, CH-3011 Bern [ueli.gruner@k-h.ch]

³ SKH Geologen AG, Bahnhofplatz 1a, CH-6370 Stans

⁴ SBB AG, I-AT-IU, Mittelstrasse 43, CH-3000 Bern 65

den 1970er Jahren werden im Bereich des Bergsturzes von 1936 zusätzlich in einem Intervall von drei bis vier Jahren als Kleintriangulationen bezeichnete Vermessungen durchgeführt. Die stark zerklüfteten Felspartien am Abrissrand des Bergsturzes werden vom Forstamt Uri mittels manueller Spaltenmessungen jährlich kontrolliert. Die entsprechenden Messergebnisse werden durch die SKH Geologen AG periodisch kommentiert, letztmals im Jahr 2011 (SKH Geologen AG 2011).

Die Gefahr von ähnlich grossen Felsstürzen wie 1936 ist aufgrund der anhaltenden Bewegungen im oberen Teil der Sackungsmasse weiterhin gegeben. Da damals der vorhandene Ablagerungsraum im mittleren Teil der Sackungsmasse weitgehend aufgefüllt worden ist, könnten weitere Abbrüche in der Grössenordnung von 1936 über die Ablagerungen von 1936 weggehen und die Bahnlinie der SBB sowie das Siedlungsgebiet von Silenen gefährden. Es zeigte sich, dass das oben genannte Frühwarnsystem zum Schutze von Bahn und Siedlung unbefriedigend bzw. sogar ungenügend war. In Frage kämen allenfalls ein Ausbau des Messstellennetzes und/oder Vermessungen in kürzeren Zeitintervallen. Da aber die bisher durchgeführten Vermessungen sehr teuer waren und nur mit den sehr kostspieligen Grosstriangulationen alle zehn Jahre ein Gesamtbild der Bewegungen erhalten werden kann, bestand die Absicht, alternative Überwachungsmethoden zu prüfen. Idealerweise sollten in kürzeren Zeitabständen Ergebnisse vorliegen, damit eine Beschleunigung der Masse oder allfällige Witterungseinflüsse besser erkannt werden können. Eine Möglichkeit bestand in der Verwendung von Radardaten von Satelliten. Terrestrische Radarüberwachungen wurden seit einigen Jahren vereinzelt in anderen Regionen getestet; diese Methode erwies sich aber in diesem Gebiet wegen der grossräumigen Sackungsmasse als ungeeignet.

Die SBB unterstützte deshalb einen Pilotversuch, um mit satellitengestützten Verschie-

bungsmessungen wo möglich im ganzen Urner Reusstal genauere Informationen über das Bewegungsverhalten von instabilen Felsmassen zu erhalten. Dank umfangreichem Datenmaterial aus einer 20-jährigen Messreihe von zwei Satelliten bestand die Möglichkeit, retrospektive Messresultate zu generieren und diese zu interpretieren. Die Zielsetzung lautete einerseits, genauere Kenntnisse über die Deformationsgeschwindigkeiten der vergangenen 20 Jahre zu erhalten, andererseits auch das Wissen über die Abgrenzung der Masse und ihren Bewegungsmechanismus zu verbessern. Zudem interessierte auch der Einfluss der Witterung auf das Bewegungsverhalten (1999 mit einem nassen Frühling und 2005 mit extremen Regenfällen im Sommer). Als weiterer Punkt stand die Frage im Raum, ob sich der im Jahr 2009 im Rohbau fertig erstellte Gotthard-Basistunnel mit den beiden unter der Sackungsmasse verlaufenden Röhren auf die Bewegungsgeschwindigkeit auswirkt, da in diesem Abschnitt seit dem Bau viel Bergwasser drainiert wird. Zudem wollte man im Fall der Chli Windgällen wissen, ob mit solchen Messungen von vergangenen Bewegungen auch zukünftige und auch kostengünstigere Gebietsüberwachungen vorgenommen werden können, die der SBB in der Früherkennung eines grossen Gefahrenpotenzials wichtige Informationen liefern könnten.

Für das Pilotprojekt von satellitengestützten Verschiebungsmessungen im Urner Reusstal zwischen Sisikon und Wassen wurden Radardaten von zwei Satelliten ausgewertet, welche im Zeitraum zwischen 1992 und 2010 den Globus umkreisten (Gamma Remote Sensing AG 2012 und Kellerhals + Haefeli AG 2012).

2 Die Methode der Radar Interferometrie

Radar-Instrumente sind aktive Sensoren im Mikrowellenbereich. Aktiv bedeutet, dass ein Signal ausgesendet wird. Dieses elektro-

magnetische Signal wird von den Zielobjekten gestreut. Ein Teil der gestreuten Wellen wird vom Empfänger auf-gezeichnet. Mittels einiger technischen Hilfsmittel (z. B. Verwendung eines «Chirp Signals» und durch das kohärente Aufzeichnen der Signale entlang der sogenannten «Synthetischen Apertur») gelingt es, Gebiete vom Satelliten aus mit einer ansprechenden Auflösung im Bereich von etwa 1 m bis 20 m räumlich abzubilden. Ein Synthetische Apertur Radar (SAR) ist ein kohärentes System, welches sowohl die empfangene Signalintensität als auch die Signalphase aufzeichnet. Entlang vom Ausbreitungspfad durchläuft die Signalphase pro Wellenlänge einen Phasenzklus (2π). Bei den C-Band Sensoren (ERS, ENVISAT, Radarsat) beträgt die Wellenlänge ca. 5.6 cm. Bei der interferometrischen Auswertung werden relative Phasendifferenzen zwischen zwei zu verschiedenen Zeiten aufgenommenen Radarabbildungen aufgezeichnet. Die Empfindlichkeit der Systeme entspricht einem Bruchteil eines Phasenzklus, wodurch sehr kleine Phasendifferenzen erfasst werden können. Verschiebt sich zwischen zwei Aufnahmen die Geländeoberfläche, so führt dies zu einer leicht veränderten Distanz zwischen dem Radarsensor und dem entsprechenden Oberflächenelement, was im Interferogramm zu einer Phasenveränderung führt. Differentielle Auswertmethoden werden verwendet, um verschiedene Anteile der interferometrischen Phase zu separieren. Zur Interpretation von Geländebewegungen werden dabei andere Phasenteile wie etwa die topographische Phase so gut wie möglich modelliert und subtrahiert.

Um langsamere Bewegungen (mm/Jahr bis cm/Jahr) zu erfassen, werden längere Beobachtungsintervalle verwendet. Über veränderlichen Oberflächen wie Wasser oder Vegetation dekorreliert das Signal, womit diese Methode nicht angewendet werden kann. Ein weiteres Problem in alpinem Gelände ist, dass zu einem Teil der Oberfläche vom Satelliten aus keine Sichtverbin-

dung besteht (Abschattung) oder dass sich verschiedene Teile der Oberfläche in der gleichen Schrägdistanz zum Sensor befinden, womit sie sich im Radarbild überlagern («Layover»). Deshalb kann das Signal ebenfalls nicht zuverlässig interpretiert werden. Nur in Bereichen mit guter Kohärenz kann die Phase interpretiert werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die SAR-Bildwerte komplexen Zahlen entsprechen und damit die Phase zunächst nur Modulo 2π bekannt ist, also eine Mehrdeutigkeit aufweist. Im sogenannten «phase unwrapping» wird diese Mehrdeutigkeit der Phasen im differentiellen Interferogramm aufgelöst. Dazu werden – von einem räumlichen Referenzpunkt ausgehend – die durchlaufenen Phasenzyklen gezählt. Für Flächen von guter Kohärenz, für die das «phase unwrapping» erfolgreich durchgeführt werden konnte, erhält man relative Verschiebungswerte und, durch Division durch das Zeitintervall zwischen den beiden SAR Aufnahmen, relative Bewegungsraten. Die Hauptfehlerquelle ist dabei die Signalverzögerung in der Atmosphäre, welche räumlich und zeitlich variiert und deshalb die differentiellen Interferogramme beeinflussen kann. Solche relativen Signalverzögerungen verursachen in der Atmosphäre bei den berechneten Verschiebungswerten Fehler von mehreren Zentimetern; mittlere verursachte Fehler sind normalerweise im Bereich von etwa einem halben Zentimeter. Um langsamere Verschiebungsraten in der Größenordnung von 1 cm/Jahr zuverlässig zu bestimmen, sind diese «atmosphärischen Fehler» ein grosses Problem. Um für einen Grossteil der Fläche eine gute Kohärenz zu haben, müsste man idealerweise SAR-Bildpaare mit einem kurzen Zeitintervall von z. B. 35 Tagen verwenden. Ein Fehler von 0.5 cm resultiert aber bereits in einem Verschiebungsratenfehler von ca. 5 cm/Jahr, weshalb langsame Geländebewegungen nicht zuverlässig bestimmt werden können. Um dieses Problem zu lösen, hat Gamma Remote Sensing Methoden entwickelt, welche nicht auf einem einzelnen Interferogramm basieren,

sondern die eine Vielzahl von interferometrischen Paaren berücksichtigen. Die Grundidee dabei ist, dass das Bewegungssignal mit einer zunehmenden kumulierten Beobachtungszeit linear zunimmt, dass sich die atmosphärischen Fehler aber wegen ihrer statistischen Unabhängigkeit nur mit der Wurzel aus der Anzahl Paare vergrössern. Damit kann der Fehler der bestimmten Bewegungsrate deutlich reduziert werden. Bei Verwendung von 20 oder mehr über mehrere Jahre verteilten SAR-Bildern kann der Bewegungsratenfehler auf 1 mm/Jahr reduziert werden. Zudem erlaubt die Verwendung vieler Bilder auch, Bewegungen zeitlich zu verfolgen.

Eine Bedingung für solche Auswertungen ist, dass die Kohärenz über eine lange Zeit erhalten bleibt. Oft ist das nur für feste Oberflächen der Fall, z. B. bei Fels oder bei grossen Bauten (Gebäude, Dämme etc.). Eine zunehmend angewandte Auswertungsmethode, genannt «Persistent Scatterer Interferometry (PSI)», besteht deshalb darin, zuerst solche Flächen zu identifizieren und dann die interferometrische Zeitreihenauswertung nur für diese Gebiete durchzuführen. Die daraus resultierenden Bewegungskarten haben primär in überbauten Gebieten (Siedlungsgebiete, Industrie etc.) sowie oberhalb der Waldgrenze (wenig Vegetationsbedeckung) eine gute räumliche Abdeckung. Für bewaldete und landwirtschaftlich bewirtschaftete Flächen können normalerweise keine Bewegungsraten bestimmt werden. Dies war auch bei den in diesem Gebiet durchgeführten Untersuchungen der Fall.

3 PSI-Auswertung für die Hänge östlich vom Urner Reusstal

3.1 Verwendete Satelliten-Radardaten

Für die durchgeführte Auswertung wurden Radardaten der ERS-1/2-Satelliten (1992–2000, 46 Aufnahmen) und des ENVISAT-Satelliten (2003–2010, 36 Aufnahmen)

aus descending orbits verwendet. Descending bedeutet dabei, dass der Satellit während der Aufnahme Richtung Süden fliegt. Da das Radarinstrument in der Flugrichtung nach rechts orientiert ist, sind in descending orbits aufgenommene Daten insbesondere für Verschiebungsmessungen auf gegen Westen einfallenden Hängen, also z. B. für die Sackungen im Gebiet Windgällen, gut geeignet.

Aufnahmen während den Wintermonaten wurden nicht ausgewertet, da die Schneebedeckung das Radarsignal einerseits dekorreliert und andererseits die Phase wesentlich beeinflusst. Damit konnten 46 ERS-1/2 Aufnahmen und 36 ENVISAT Aufnahmen verwendet werden, d. h. etwa vier bis fünf Messungen pro Jahr.

3.2 Interferometrische Zeitreihenauswertung

Für die Daten der beiden Satelliten ERS-1/2 (1992–2000) und ENVISAT ASAR (2003–2010) wurde separat je eine PSI-Auswertung durchgeführt. Die Daten wurden zu einer Referenzszene (19980904 für ERS-1/2, 20070803 für ENVISAT) koregistriert. Um dies möglichst genau zu machen wurden dabei auch durch die Topographie verursachte Stereoeffekte berücksichtigt. Als nächstes wurde ein Bildausschnitt, welcher das Untersuchungsgebiet einschliesst, ausgewählt. Für diesen wurden die SAR-Daten georeferenziert und Geländehöhen in die SAR-Geometrie übertragen, um diese zur Simulation der interferometrischen Höhenphase zu verwenden.

In der Zeitreihenanalyse wurden die interferometrischen Phasen berechnet und interpretiert. Dabei wurde die räumliche und zeitliche Konsistenz der Lösung benutzt, um ungeeignete Teile der Lösung zu erkennen und daraus zu eliminieren.

Die Abweichung von einer linearen Bewegung diente dabei als ein statistisches Qualitätsmerkmal. Für lineare Bewegungen konnte so die mittlere Bewegungsrate im Beob-

achtungszeitraum mit einer statistischen Genauigkeit von ca. 1 mm/Jahr bestimmt werden. Nicht-lineare Bewegungsverläufe werden auf diese Weise jedoch nicht optimal erfasst.

Die bestimmten Verschiebungswerte entsprechen der Komponente der Bewegung in der Blickrichtung des Radar-Sensors, also in einer zum Zenit ca. 23 Grad gegen Osten (resp. 10 Grad südlich von Osten) geneigten Richtung (Fig. 1). Die in Tab. 1 aufgelisteten Faktoren helfen, die Komponente der Bewegung in der Blickrichtung des Radar Sensors für verschiedene Bewegungsrichtungen zu skalieren.

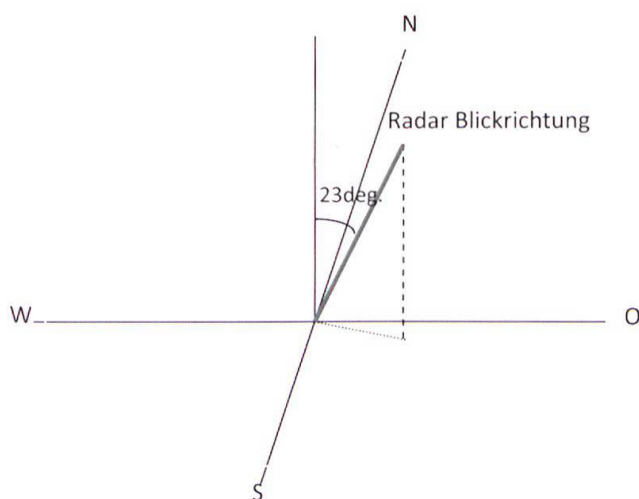


Fig. 1: Radar-Abbildungsgeometrie.

Diese in Descending Orbits aufgenommenen Daten sind primär für flache Gebiete und gegen Westen geneigte Hänge geeignet. Gegen Osten geneigte Hänge sind stark von

Layover-Effekten beeinträchtigt. Layover schränkt die Abdeckung teilweise auch in relativ engen steilen Tälern ein (z. B. im Bereich Erstfeld).

4 Resultate

4.1 Allgemeines

Das primäre Resultat der interferometrischen Auswertung sind Zeitreihen von Verschiebungswerten für geeignete Streuziele im Testgebiet des Urner Reusstals. Als Übersicht sind in Fig. 2 die mittleren Verschiebungsraten (Komponente in Radar-Blickrichtung) für die Auswertungen von ERS-1/2 (1992–2000) und von ENVISAT ASAR (2003–2010) dargestellt. Dabei zeigen gelbe, orange und rote Farbtöne Bewegungen vom Satelliten weg an, das heisst Verschiebungen gegen unten. Grüne Farbtöne bedeuten, dass keine oder nur sehr geringe Bewegungen stattgefunden haben. Diese Gebiete können als stabil betrachtet werden. Blaue Farbtöne würden Bewegungen nach oben in Richtung des Satelliten anzeigen. Solche Bewegungen wurden jedoch nicht registriert.

Der Untersuchungsperimeter kann, bedingt durch die vorgegebene Beobachtungsrichtung (line-of-sight, LOS) der Satelliten und wegen der Bedeckung der Geländeoberfläche mit Vegetation nicht lückenlos überwacht werden. Solche nicht gemessenen

Bewegungsrichtung	N	NW	W	SW	S
horizontal	10.85	1.47	2.42	4.50	10.85
20 deg.	2.50	1.13	1.43	1.90	4.48
40 deg.	1.53	1.02	1.11	1.33	1.95
60 deg.	1.20	1.02	1.01	1.11	1.35
vertikal	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09

Tab. 1 Skalierungsfaktoren für diverse Bewegungsrichtungen (Horizontal: = 0° Neigung, vertikal = 90° Neigung). Anwendungsbeispiel: Für einen Bewegungsvektor Richtung Westen, mit einer Neigung gegenüber der Horizontalen von 40° wird die Komponente der Bewegung in der Blickrichtung des Radar Sensors mit einem Faktor 1.11 skaliert.

Bereiche sind in den beiden Bildern der Fig. 2 jeweils farblos. Die Messgenauigkeit für lineare Bewegungen beträgt etwa 1 mm/Jahr. Die räumliche Auflösung liegt in der Größenordnung von 20 m. Auffallend sind die Bewegungen, wie die Fig. 2 zeigt, in erster Linie im Gebiet westlich der Chli Windgällen (dort am stärksten am Pfaffen; Fig. 4), aber auch im Gruontal oberhalb von Flüelen sowie im Schächental östlich von Altdorf.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen an der Westflanke der Chli Windgällen detaillierter diskutiert. Ergänzend werden zudem auch die Daten für das hintere Gruontal diskutiert. Diese zeigen Rutschbewegungen wie auch diejenigen im Schächental. Diese Rutschungen wurden bereits früher durch verschiedene Kartierungen verifiziert. Im Gebiet Glöcheret auf der linken Talseite oberhalb von Attinghausen besteht ein rund

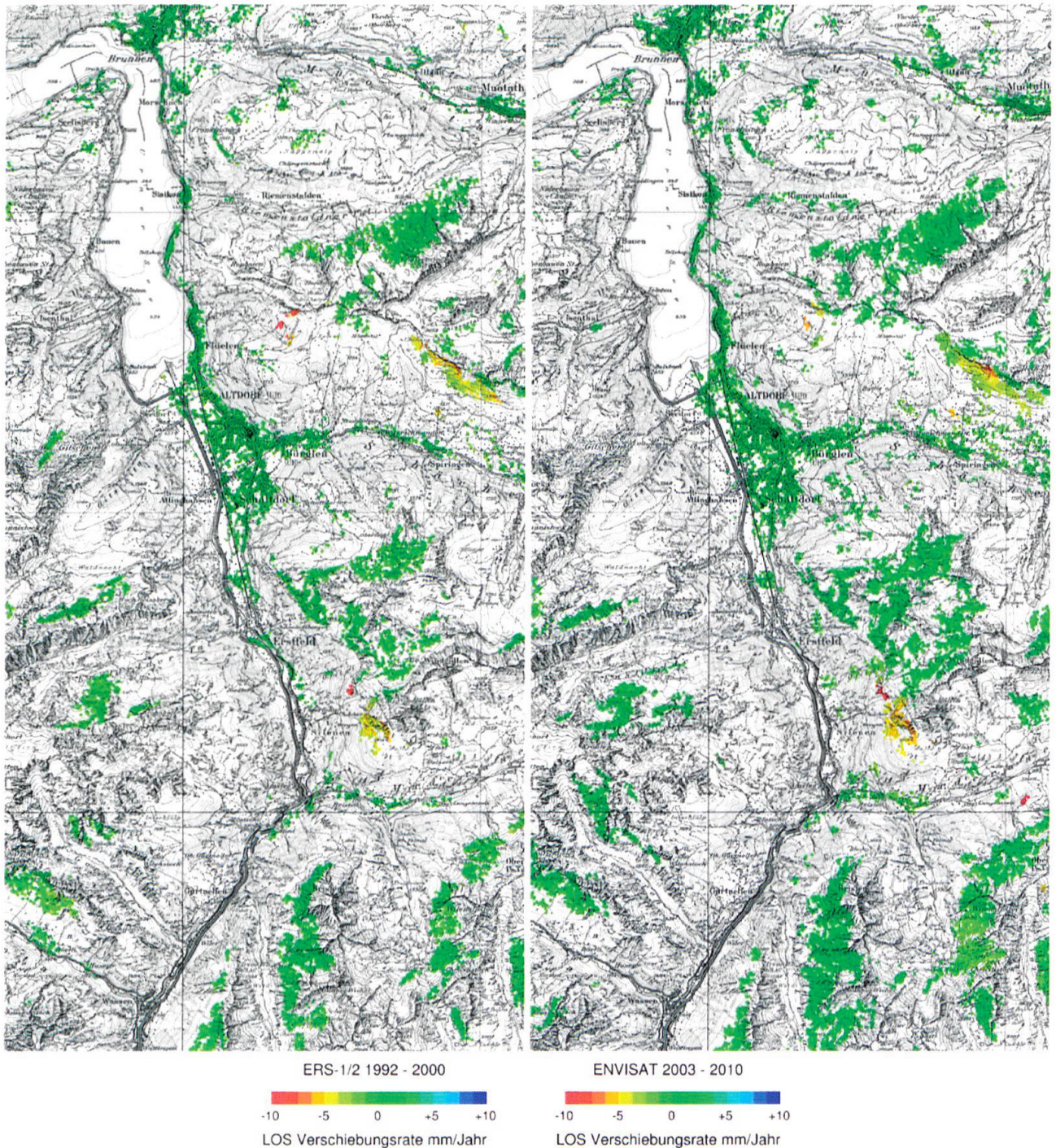


Fig. 2: Mittlere Verschiebungsrate in Radar-Blickrichtung für die Jahre 1992–2000 [Satellit ERS; links] und für die Jahre 2003–2010 [Satellit ENVISAT; rechts].

0.5 Mio. m³ umfassendes Rutschgebiet, das im Jahr 1999 nach den grossen Schnee- und Regenfällen massive Bewegungen zeigte (Louis-Meier & Seiler 2000). Da diese Talflanke aber bezüglich der Satelliten eine ungünstige Exposition aufweist, wurden diese Bewegungen nicht erkannt.

4.2 Westflanke der Chli Windgällen

Allgemeines zur Geologie

Der untere Teil des Sackungsgebietes liegt im Erstfelder Gneis, der den nördlichen Teil des Aarmassivs aufbaut. Oberhalb von rund 2000 m ü. M. folgt die autochthone Sedimentbedeckung des Massivs, die vorwiegend aus Kalken des Dogger und des Malm besteht. Eine schematische Darstellung der Geologie ist auf der Fig. 3 (Schema A) zu sehen (aus Schneider 1984). Das darauf dargestellte Profil verläuft etwa durch den Anrissbereich des eingangs erwähnten Felssturzes von 1936 (Fig. 4). Der Erstfelder Gneis ist ein teilweise migmatischer, glimmerarmer Gneis mit einer steil gegen Südosten, das heisst etwa bergwärts einfallenden variskischen Schieferung oder Stoffbänderung. Im Süden gegen das Maderanertal kommt eine alpine, steil nach Südsüdosten gerichtete Schieferung dazu, die etwa parallel zum Maderanertal verläuft. Der Kontakt zwischen Gneis und Sedimenten fällt grossräumig flach gegen Nordosten, d. h. bergwärts ein. Kleinräumig können Verschuppungen mit anders orientierten Kontaktflächen beobachtet werden. Die Schichtung der Sedimente fällt wie der Kontakt zum Gneis meist flach gegen Nordosten. Der Felssturz von 1936 ereignete sich aus den aus Malmkalken aufgebauten Felswänden im obersten, östlichsten Teil der Sackungsmasse. Die ganze Sackungsmasse wird zuoberst durch eine Südost-Nordwest streichende, steil einfallende Bruchzone mit markanten Nackentälchen deutlich vom stabilen Teil der Chli Windgällen mit dem Gipfel weiter östlich getrennt (z. B. auch durch den rund 80 m breiten, markanten Graben des Stein- tals; Fig. 4).

Die Begrenzungen der Masse seitlich und gegen das Reusstal sind wegen des unklaren Bewegungsmechanismus weniger gut definierbar. Innerhalb der Sackungsmasse sind zahlreiche weitere Nackentälchen vorhanden. Auf der Fig. 4 sind einige davon schematisch eingezeichnet.

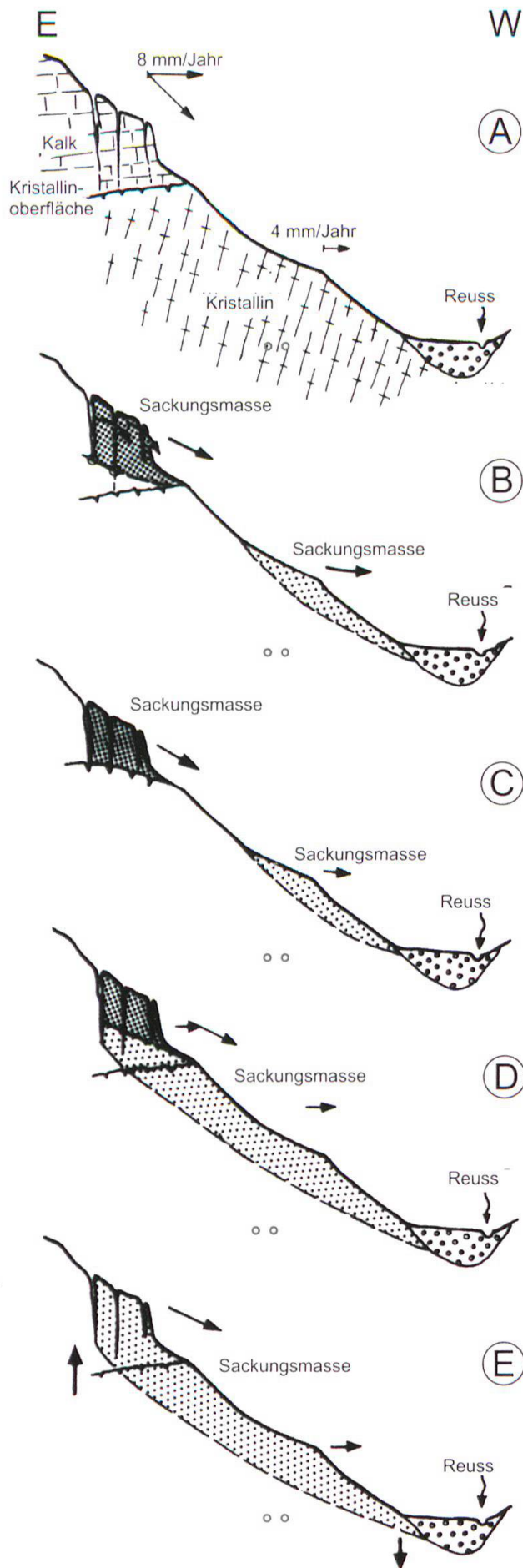
Die bisher durchgeführten geodätischen Vermessungen in der Westflanke der Chli Windgällen ergaben während der mehrere Jahrzehnte dauernden Messperiode etwa gleichbleibende Bewegungen der einzelnen Messpunkte. Die grössten Bewegungen wurden mit 11 bis 13 mm Verschiebung/Jahr im östlichsten, am höchsten gelegenen Teil der Sackungsmasse im Bereich der Bruchzone etwa auf 2300 m ü. M. registriert. Die Bewegungsrichtungen verlaufen bei den meisten Punkten in diesem Gebiet mit etwa 45° Neigung gegen Westen, d. h. talwärts. Im weiter unten liegenden Teil der Sackungsmasse, etwa auf einer Höhe von 1100 m ü. M., wurden Bewegungen von 4 bis 5 mm/Jahr ungefähr horizontal gegen Westen gemessen (Fig. 3).

In Fig. 3 sind auch die in Schneider (1984) aufgeführten, in Frage kommenden Bewegungsmechanismen dargestellt. Es werden zwei prinzipiell verschiedene Bewegungsarten diskutiert. Die Schemas B und C zeigen zwei getrennt ablaufende Sackungen, die unabhängig voneinander und relativ flachgründig sind. In den Schemas D und E werden tief ins Kristallin hinabgreifende, zusammenhängende Bewegungen dargestellt. Eine weitere unbeantwortete Frage ist, ob die Verschiebungsgeschwindigkeit witterungsabhängig ist oder jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt.

Aus den Resultaten der alle drei Jahre durchgeführten geodätischen Vermessungen konnten bisher keine Hinweise über den Einfluss der Witterung auf die Bewegung der Sackungsmasse gewonnen werden.

Resultate der radargestützten Satellitenüberwachung 1992–2011

Die bei den geodätischen Vermessungen festgestellten Verschiebungen sind im obe-



A
Schematische Darstellung der Geologie und der gemessenen mittleren Verschiebungen (1933-1984)

B
Zwei getrennte Massen: Kristallin + Kalk. Kristallin mit oberflächlichem Hakenwurf. Kalk z. B. auf Basis der offenen Spalten kippend

C
Analog B, aber Kalk auf anormal verlaufender Kristallinoberfläche gleitend

D
Grundgleitung der Gesamtmasse, überlagert von zusätzlicher Bewegung des Kalkes

E
Rotation einer Gesamtmasse

Fig. 3: Schematische Darstellung der denkbaren Bewegungsmechanismen der Sackungsmasse in der Westflanke der Chli Windgällen (Schemas A bis E; aus Schneider 1984, leicht modifiziert). Hinzugefügt wurden die beiden Tunnelröhren des neuen Gotthard-Basistunnels.

In der Fig. 5 sind die Bewegungen westlich der Chli Windgällen in einem grösseren Massstab und mit einer geringeren Verschiebungsskala dargestellt. Es zeigt sich dabei, dass sowohl für den Zeitraum 1992 bis 2000 als auch für denjenigen zwischen 2003 und

Die im südlichen Bereich der Windgällen erhaltenen jährlichen Verschiebungsbeträge



sind mit 5 bis 6 mm etwas geringer als die durch die geodätischen Vermessungen ermittelten. Wie aus der Fig. 2 mit einer grösseren Skala der jährlichen Verschiebungsbeträge dargestellt, liegen beim Pfaffen die Bewegungsbeträge mit gegen 10 mm/Jahr jedoch deutlich höher. Im unteren Teil der Masse sind praktisch keine aussagekräftigen Resultate verfügbar. Die Gründe sind die Bedeckung mit Vegetation sowie die Steilheit des Geländes.

Die Auswertung der Satellitendaten zeigt, dass zwischen 1992 und 2011 grundsätzlich keine Veränderungen zu beobachten sind. Die Daten ergänzen sich teilweise, da gewisse Areale nur von einem Satelliten abgedeckt wurden. Sie erlauben allerdings keine genauere Eingrenzung der Sackungsmasse.

Die folgenden Fig. 6 und 7 zeigen die gemessenen Verschiebungen mittels einer Darstellung von Zeitreihen. Aufgetragen sind die Verschiebungen eines Punktes in der Westflanke der Chli Windgällen (die beiden Punkte sind zwar nicht identisch, liegen aber

nahe beieinander). Die Einzelmessungen der Zeitreihen zeigen eine gewisse Streuung. Es ist daher schwierig, aus der jeweils weniger als zehn Jahre langen Messdauer einer Zeitreihe klare Trends herauszulesen.

Die gemessenen Punkte liegen im Bereich der Ablagerungen des Felssturzes von 1936. Die Geschwindigkeiten sind ähnlich schnell wie beim anstehenden Fels unmittelbar bergseits davon.

Einfluss der Witterung

In der Zeitreihe 1992 bis 2000 (Fig. 6) ist vor allem das Jahr 1999 interessant. Nach dem schneereichen Winter und dem sehr nassen Frühjahr 1999 wurde zunächst eine deutliche Beschleunigung registriert. Spätere Messungen korrigieren dieses Bild allerdings wieder, so dass es möglich ist, dass die (scheinbare) Beschleunigung noch innerhalb der Streubreite der Messungen gelegen hat.

Ein ähnliches Bild zeigt sich für das Jahr 2005 in Fig. 7. Nach den intensiven Regenfällen in jenem Sommer schien eine Beschleunigung

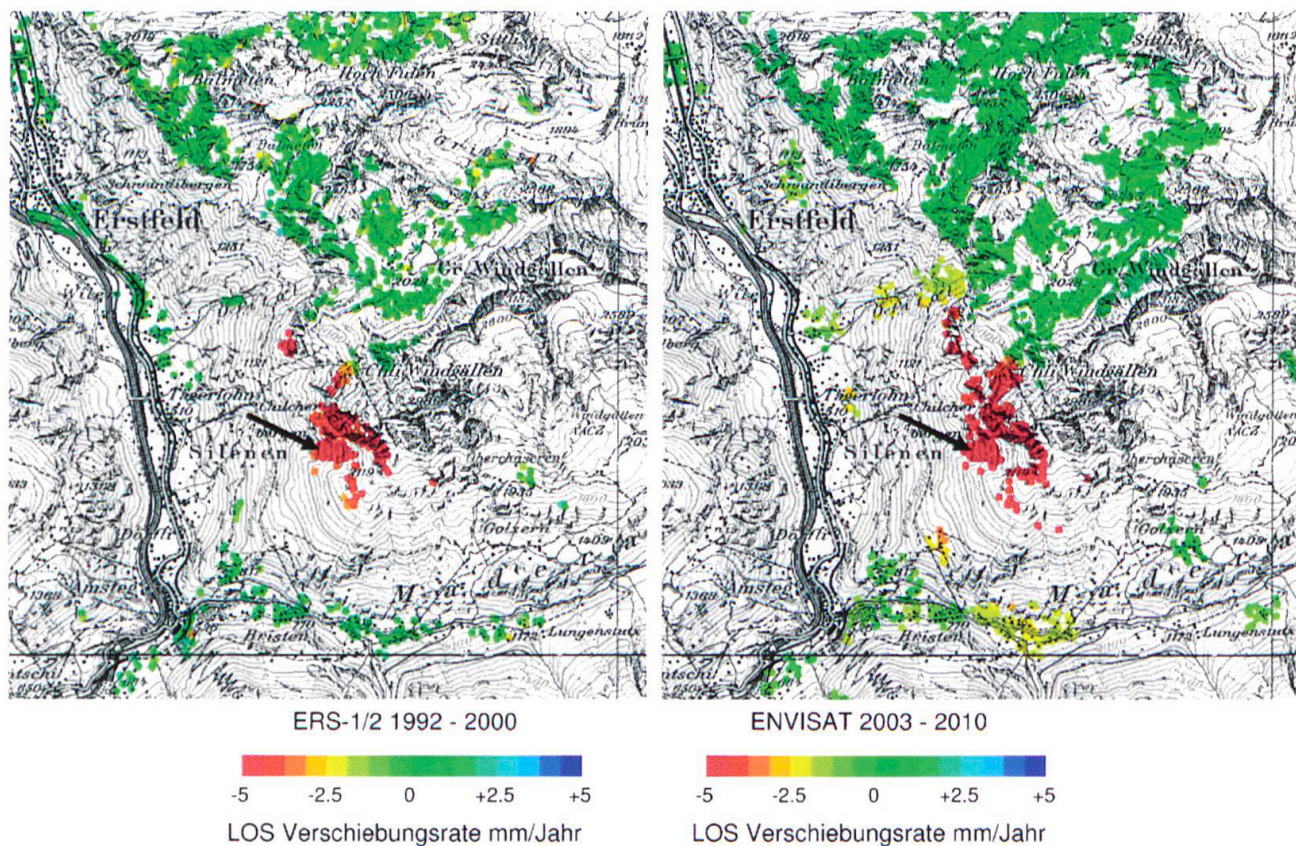


Fig. 5: Mittlere Verschiebungsrate im Gebiet der Chli Windgällen in den Jahren 1992 bis 2000 (Satellit ERS; links) und 2003 bis 2010 (Satellit ENVISAT; rechts). Massstab ca. 1 : 80'000. Der schwarze Pfeil markiert einen Punkt, von dem die Verschiebungsdaten in einer Zeitreihe dargestellt sind (Fig. 6, 7).

nigung zu erfolgen. Die nachfolgenden Daten lagen allerdings wieder im gleichen Trend wie zuvor.

Damit kann die generelle Aussage gemacht werden, dass auch ausserordentliche Niederschlagsereignisse im jetzigen Zeitpunkt keine relevante Beschleunigung der Bewegungen ergeben.

Einfluss der Drainage des Gotthard-Basistunnels

Von Interesse ist auch, ob sich nach dem Tunnelbau der beiden Röhren für den Gotthard-Basistunnel (Fertigstellung 2009) Veränderungen im Bewegungsverhalten im Sackungs- und Felsgebiet westlich der Chli Windgällen ergeben. Im Jahr 2009 wurden in den beiden Röhren während der Schneeschmelze eine Bergwassermenge von über

460 l/s registriert (Alp-Transit Gotthard AG 2012). Davon floss der grösste Teil im Abschnitt unterhalb der Sackungsmasse zu. Als Herkunft des Wassers kommt der mittlere und obere Teil der Sackungsmasse in Frage, wo zahlreiche Nackentälchen das Versickern von Wasser erleichtern und zurzeit des grössten Wasseranfalls noch Schnee lag. Im Normalfall liegt die Drainageleistung bei 200–250 l/sec.

Fig. 8 zeigt die Situation schematisch in Querprofilen ähnlich wie in Fig. 2. Aufgrund der Drainage durch die beiden Tunnelröhren ging die Schüttung einiger Quellen im mittleren Bereich der Sackungsmasse deutlich zurück (Alp-Transit Gotthard AG 2012).

Die Grenze zwischen der Strömung im ungesättigten und im gesättigten Bereich wird durch die drainierenden Tunnelröhren deut-

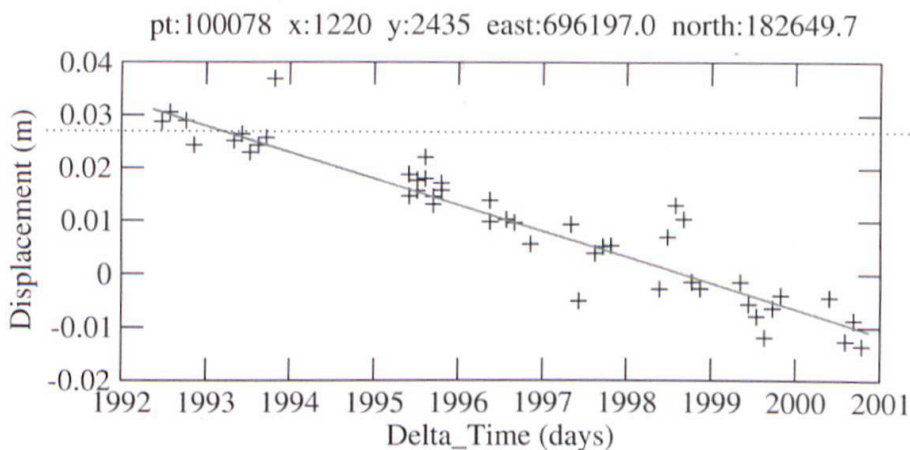


Fig. 6: Zeitreihe der Verschiebung des in Fig. 5 markierten Punktes im Zeitraum zwischen 1992 und 2000 (ERS-Satellit). Die mittlere Verschiebung betrug rund 5 mm/Jahr.

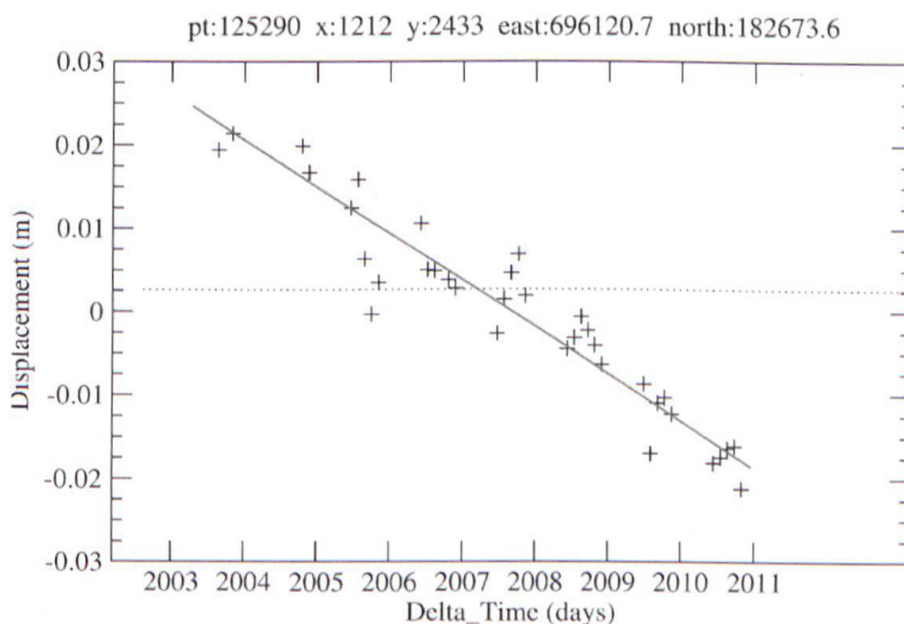


Fig. 7: Zeitreihe der Verschiebung des in Fig. 5 markierten Punktes im Zeitraum zwischen 2003 und 2010 (ENVISAT-Satellit). Die mittlere Verschiebung betrug rund 5.6 mm/Jahr.

lich tiefer gesetzt. Die Frage stellte sich, ob die Senkung des Bergwasserspiegels möglicherweise zu einer Verlangsamung der Bewegungen im Sackungsgebiet führt. In den jüngsten Satellitenmessungen 2010 (Fig. 7)

wurden (noch) keine Veränderungen gegenüber früher festgestellt. Generell ist jedoch zu erwarten, dass ein allfälliger Trend zu einer Verlangsamung der Bewegungen erst in einigen Jahren erkennbar wäre.

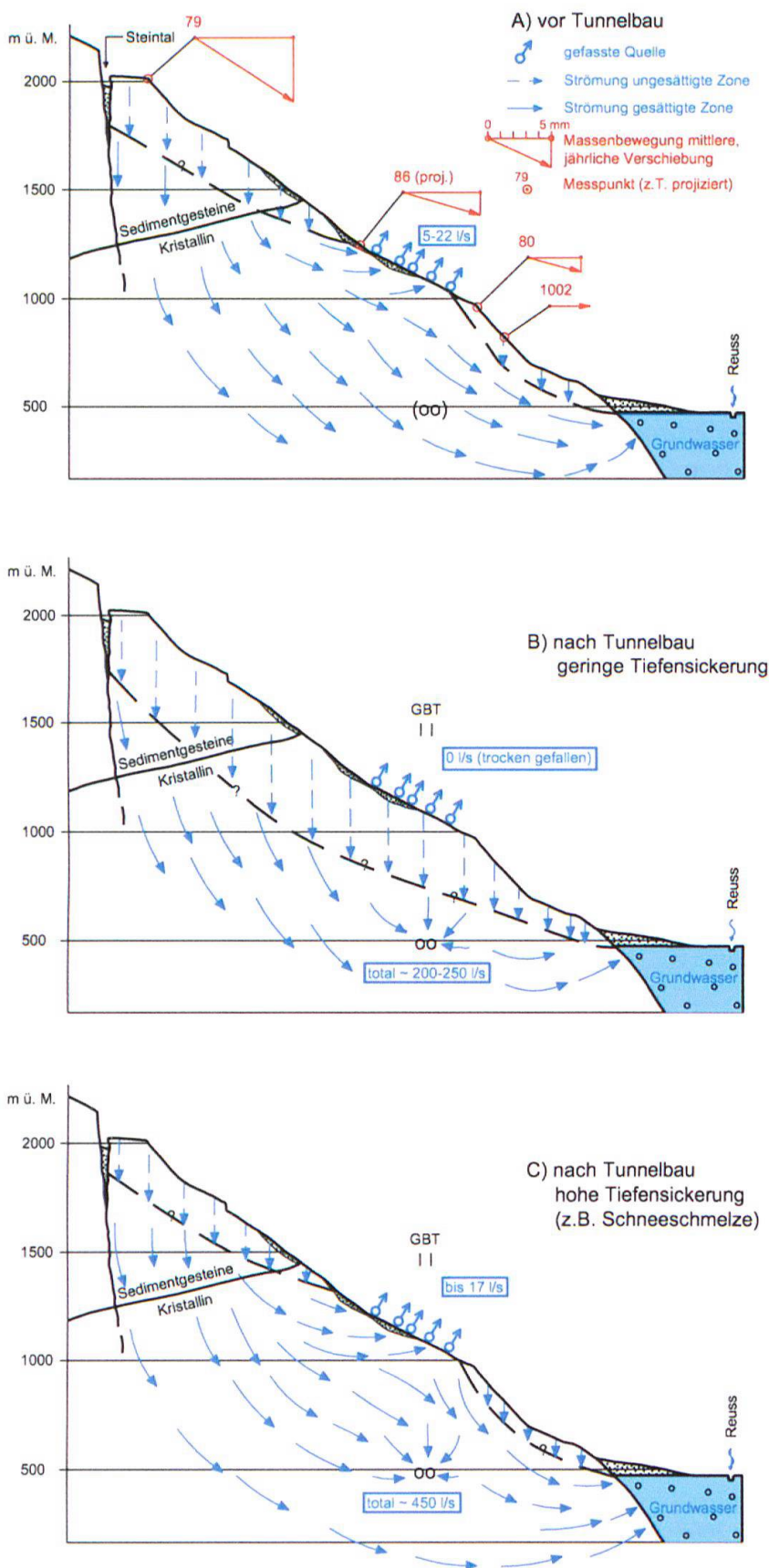


Fig. 8: Schematische Darstellung der Wasserzirkulation in der Westflanke der Chli Windgällen (aus dem Geologischen Bericht Teilabschnitt Erstfeld; Alp-Transit Gottard AG 2012).

Geologische Interpretation

Bei einem Pauschalgefälle von 34° bis zur Bahnlinie können schon kleinere Ereignisse mit einem Sturzvolumen von weniger als $100'000 \text{ m}^3$ die Bahnlinie erreichen. Die Auswertung der Satellitendaten bestätigt die bereits bekannten Erkenntnisse, wonach die Verschiebungen in der Messperiode 1992 bis 2010 mit mehr oder weniger gleich bleibender Geschwindigkeit stattfinden. Dabei sind die grössten Verschiebungsbeträge im Bereich der Ausbruchwand des Felssturzes von 1936 zu verzeichnen. Vorderhand fehlen Daten aus dem unteren Teil der Westflanke wenig oberhalb des Talbodens. Solche Messergebnisse könnten helfen, den Bewegungsmechanismus der Sackung besser zu verstehen. Wie die Fig. 4 zeigt, sind jedoch auch Teilgebiete unterhalb der Ausbruchwand des Felssturzes von 1936 in Bewegung. Eine genauere Abgrenzung der Sackungsmasse ist aber weiterhin nicht möglich. Witterungsbedingte oder von der Jahreszeit abhängige Beschleunigungen oder Verlang-

samungen konnten nicht festgestellt werden. Auch ist die Streuung der Daten im Verhältnis zu den Verschiebungsbeträgen eher gross. Im Winter sind zudem infolge Schneebedeckung keine nutzbaren Messungen möglich.

4.3 Beispiel Gruontal bei Flüelen

Im hinteren Gruontal bei Flüelen wurden an drei Stellen auf einer Höhe zwischen etwa 1500 bis 1900 m ü. M. deutlich messbare Bewegungen festgestellt. In Fig. 9 sind diese Gebiete mit roten Farbtönen gut zu erkennen.

Der Felsuntergrund der instabilen Gebiete gehört zum Malm an der Basis der Axen-Decke sowie zum darunter liegenden Wildflysch und dem Altdorfer Sandstein des Nordhelvetischen Flysch.

Wie die Zeitreihe zwischen 1992 und 2000 eines ausgewählten Punktes zeigt (Fig. 10), werden dort gleichmässige Bewegungen von rund 15 mm/Jahr festgestellt.

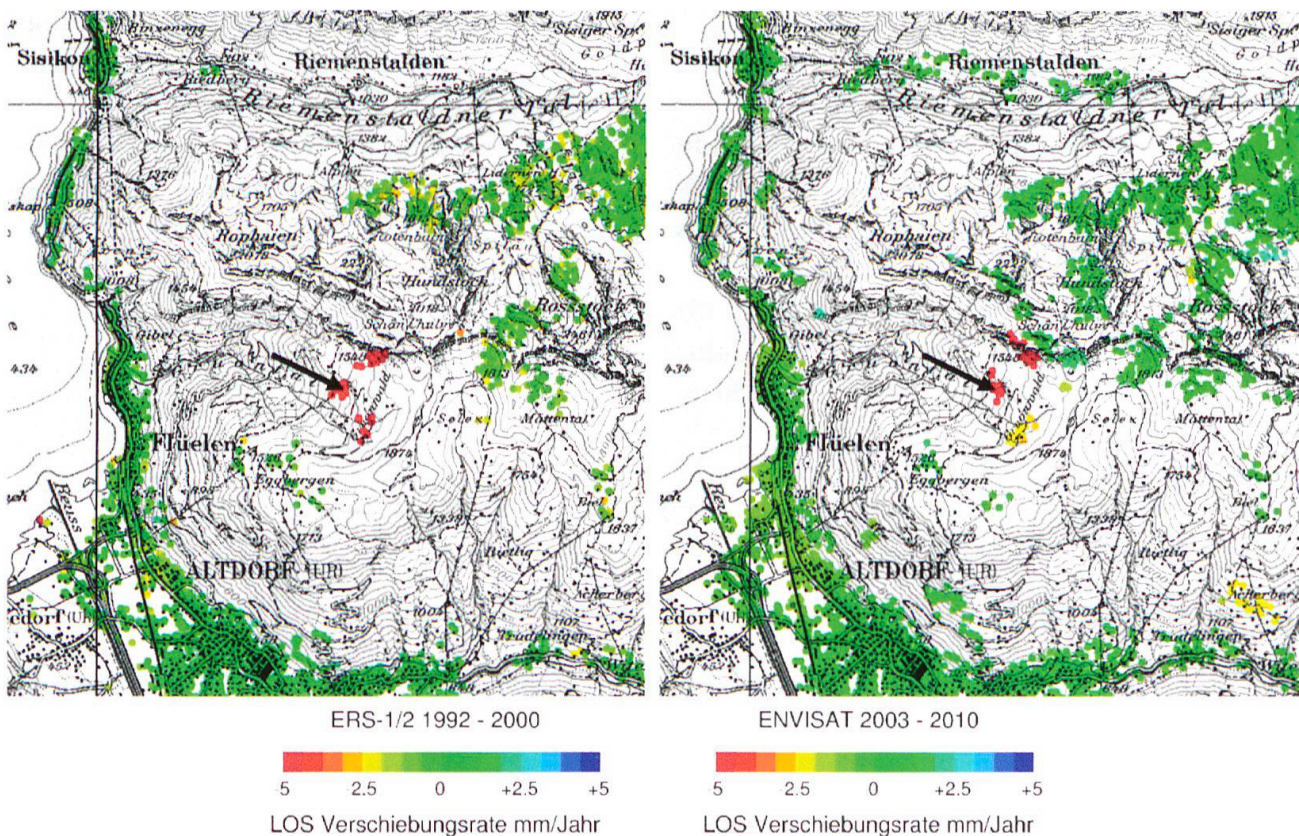


Fig. 9: Mittlere Verschiebungsrate im Gebiet des hinteren Gruontals in den Jahren 1992–2000 (Satellit ERS; links) und 2003–2010 (Satellit ENVISAT, rechts); Massstab ca. 1 : 80'000. Der schwarze Pfeil markiert einen Punkt, von dem die Verschiebungsdaten in einer Zeitreihe dargestellt sind (Fig. 10).

Da die drei Gebiete nahe beieinander liegen und ähnliche Verschiebungsgeschwindigkeiten aufweisen, ist es wahrscheinlich, dass nicht drei getrennte, sondern nur ein einziges, grosses Gebiet im hinteren Gruontal in Bewegung ist.

5 Vor- und Nachteile der Satellitenradar gestützten Verschiebungsmessungen

Gemäss den gemachten Erfahrungen kann die satellitengestützte Radarüberwachung von Geländeverschiebungen fallweise als Ergänzung oder auch als Ersatz für geodätische Überwachungen dienen.

In vielen Gebieten mit grossvolumigen, noch wenig bekannten Massenbewegungen kann dieses Verfahren grosse Vorteile aufweisen; je nach Disposition des Geländes bestehen aber auch gewichtige Nachteile. Grundsätzlich sind allerdings immer auch geologische Feldaufnahmen nötig, damit die gemessenen Resultate richtig interpretiert werden können.

Die Vorteile dieser Methode sind:

- Es können grosse, zusammenhängende Gebiete überwacht werden, ohne vorgängig Messpunkte zu setzen (z. B. wenn das Gebiet schwer zugänglich ist).
- Die Messgenauigkeit ist hoch und liegt für lineare Bewegungen bei etwa 1 mm/Jahr; die räumliche Auflösung beträgt rund 20 m.

- Dank den früheren Satellitendaten besteht mit dieser Methode eine einzigartige Möglichkeit, Deformationen auch rückwirkend bis ins Jahr 1992 zu erfassen. Basierend auf solchermassen entdeckten, grösseren und langfristig messbaren Deformationen kann man ein flächenhaftes Früherkennungs- bzw. Warnsystem auch von grossräumigen Gebirgsgebieten aufbauen.
- Dank der Möglichkeit, von einzelnen Punkten eine Zeitreihe der Deformationen zu erstellen, kann man auch Witterungseinflüsse erkennen oder sogar anthropogene Einwirkungen auf Bewegungen erfassen.

Als Nachteile sind in erster Linie zu erwähnen:

- Die Möglichkeiten von Geländeüberwachungen richten sich nach der Beobachtungsrichtung des Satelliten. So können z. B. mit den verwendeten Daten nach Osten exponierte Hänge kaum beurteilt werden, da allfällige Bewegungen etwa senkrecht zur Beobachtungsrichtung des Satelliten verlaufen.
- Sehr steil gegen Westen exponierte Hänge und Felswände sind messtechnisch schwierig zu erfassen.
- Gelände mit grösserer Vegetationsüberdeckung und auch schneebedeckte Gebiete sind nicht messbar.

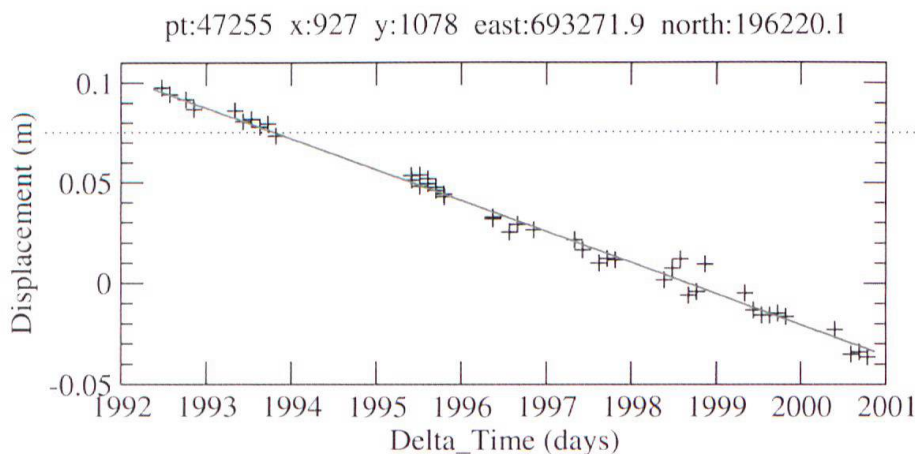


Fig. 10: Zeitreihe der Verschiebung des in Fig. 9 mit Pfeil markierten Punktes im hinteren Gruontal für die Periode 1992–2000. Die mittlere Verschiebung betrug rund 15.6 mm/Jahr.

6 Ausblick

Bei einem grösseren (vermuteten) Gefahrenpotenzial vor allem in höher gelegenen Gebieten empfiehlt es sich, in einem ersten Schritt eine rückwirkende Auswertung mittels Radar-Satellitendaten vorzunehmen. Je länger eine Messreihe ist, desto besser kann eine Deformationsentwicklung erkannt bzw. eine entsprechende Tendenz bestimmt werden. Zudem können auch Einflüsse von grossen Niederschlagsereignissen – sofern es diese Einflüsse gibt – besser verstanden werden.

Radar-Satellitendaten können jedoch nicht nur retrospektiv eingesetzt werden, sondern auch für real-time Geländebewegungen und somit als Frühwarnsystem verwendet werden. Eine neue Satellitengeneration wird in naher Zukunft praktisch jede zweite Woche ein Bild machen, das mit geeigneten Methoden ausgewertet werden kann.

Literaturverzeichnis

- Alp-Transit Gotthard AG 2012: Geologischer Schlussbericht Teilabschnitt (TA) Erstfeld.
- Bamler, R. & Hartl, P. 1998: Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, R1–R54.
- Gamma Remote Sensing AG 2012: Radarüberwachung Kanton Uri mit SAR-Daten von Envisat und ERS. Unveröffentlichter Bericht z. Hd. SBB.
- Hanssen, R. F. 2001: *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis* (328 pp). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Kellerhals + Haefeli AG 2012: Radargestützte Verschiebungsmessungen im Gebiet Urnersee – Unteres Reusstal. Unveröffentlichter Bericht z. Hd. SBB.
- Louis-Meier, K. & Seiler, J. 2000: Die Rutschung Glöcheret (Attinghausen, UR). *Bull. angew. Geol.* 5.1, 119–126.
- Rosen, P., Hensley, S., Joughin, I., Li, F., Madsen, S., Rodriguez, E. & Goldstein, R. 2000: Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88/3, 333–382.
- Schneider, T. R. 1984: Bergsturzgefahr aus dem Gebiet der Chli Windgällen. Geologische Grundlagen zur Beurteilung der Bergsturz- und Murganggefahr aus dem Gebiet Chli Windgällen. Unveröffentlichter Bericht.
- SKH Geologen AG 2011: Chli Windgällen – Verschiebungsmessungen. Beurteilung der Vermessungsdaten. Unveröffentlichter Bericht z. Hd. SBB/Kt. Uri.
- Wegmüller, U., Werner, C., Strozzi, T. & Wiesmann, A. 2004: Multi-temporal interferometric point target analysis. In Smits & Bruzzone (Eds.): *Analysis of multi-temporal remote sensing images. Series in Remote Sensing*; World Scientific 3, 136–144.

Verdankung

Die Autoren bedanken sich bei der SBB AG für die Erlaubnis, die Ergebnisse aus der Studie von Gamma Remote Sensing AG 2012 bzw. Kellerhals + Haefeli AG 2012 zu veröffentlichen. Zudem wird auch der Alp-Transit Gotthard AG (Renzo Simoni) für die Verwendung einer Grafik aus dem Schlussbericht des Teilabschnittes Erstfeld gedankt. Die verwendeten ERS-1/2 und ENVISAT Daten sind copyright ESA. Die Figuren 2, 4, 5 und 9 sind reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA130371).

