

Erfolgreicher Einsatz terrestrischer Radar-Interferometrie zur flächenhaften Vermessung von ausserordentlichen Hangrutschungsbewegungen im Gebiet Hintergraben (OW)

Rafael Caduff^{1,2}, Tazio Strozzi², Andreas Wiesmann²

Stichworte: radar interferometry, terrestrial radar, landslide displacement, deformation measurement

Zusammenfassung

Terrestrische Radar-Interferometrie ermöglicht die Detektierung und präzise Quantifizierung der Oberflächendeformation bei geologischen Massenbewegungen. Eine erfolgreiche Anwendung setzt zeitlich hohe Kohärenz zwischen zwei Radaraufnahmen voraus, was insbesondere in der Anwendung bei stark mit Vegetation bedeckten Hängen ein Problem ist. Diese Studie zeigt anhand von Messungen einer Phase aussergewöhnlicher Beschleunigung der Rutschung Hintergraben (OW) auf, wie durch kurze Aufnahmeintervalle von 3 Minuten und eine selektive Nachprozessierung Rutschungsbewegungen auch in Wiesland flächenhaft bestimmt werden können. Anhand zweier mehrstündiger Messkampagnen wird aufgezeigt, dass sowohl bei niedrigem Bewuchs (Grashöhen bis 20 cm), als auch bei hohem Bewuchs (bis 1 m) die Bestimmung des Oberflächendeformationsfeldes der Rutschung möglich ist. Die ermittelten Verschiebungsraten nahmen innerhalb von 3 Wochen von maximal 40 cm/Tag am 5. Mai 2013 auf maximal 10 cm/Tag am 28. Mai 2013 ab. Diese Resultate sind in guter Übereinstimmung mit gleichzeitig durchgeführten punktuellen Kontrollmessungen.

Abstract

Terrestrial radar interferometry allows precise detection and measurement of surface deformation related to mass movements. One of the known limitations of this technology is temporal decorrelation, affecting in particular its application in heavily vegetated areas. Based on the exceptional landslide activity in the area of Hintergraben (OW) in the Swiss Alpine Foreland we show in this study that an almost complete coverage of surface deformation can be achieved even over dense grassland with short acquisition time intervals of 3 minutes and selective post-processing. Two measurement campaigns performed on May 5 and 28, 2013 demonstrate the successful application of terrestrial radar interferometry for the measurement of surface displacement in the case of low grass-heights (max. 20 cm) respectively grass-heights reaching 1 m. We show that surface deformation rates decreased from max. 40 cm/day to max. 10 cm/day in the 3 weeks period. The findings are in good agreement with punctual control measurements performed with tachymetry.

Sommario

L'interferometria radar terrestre permette la precisa rilevazione e misurazione delle deformazioni superficiali relative a movimenti di massa. Uno dei limiti noti di questa tecnologia è la decorrelazione temporale, che ne impedisce in particolare l'applicazione su aree fortemente vegetate. In questo studio basato sull'attività eccezionale della frana di Hintergraben (OW) dimostriamo che è possibile ottenere una copertura praticamente completa della deformazione della superficie anche su pascoli grazie a brevi intervalli di acquisizione di 3 minuti e una successiva elaborazione selettiva. In due campagne di misura eseguite il 5 e il 28 maggio 2013 abbiamo utilizzato con successo l'interferometria radar terrestre su aree ricoperte sia da prati di altezza moderata (max. 20 cm) sia da erba di altezza più importante (max. 1 m). Durante questo periodo di tre settimane i tassi di deformazione sono diminuiti da un massimo di 40 cm al giorno a un massimo di 10 cm al giorno e i nostri risultati sono in buon accordo con le misure di controllo puntuali eseguite con la tachimetria.

¹ Institut für Geologie, Universität Bern, Baltzerstrasse 3, 3012 Bern [rafael.caduff@geo.unibe.ch]

² Gamma Remote Sensing AG, Worbstrasse 225, 3073 Gümligen [caduff@gamma-rs.ch, strozzi@gamma-rs.ch, wiesmann@gamma-rs.ch]

1 Ausgangslage

Terrestrische Radar-Interferometrie wurde in der jüngsten Zeit vermehrt für die Früherkennung und die Quantifizierung von kontinuierlichen Massenbewegungen eingesetzt (Caduff 2013). Ein Vorteil sind komplett berührungslose Bewegungsmessungen mit einer Präzision bis in den Sub-Millimeterbereich. Jedoch sind Einschränkungen in der Anwendung durch mangelnde interferometrische Kohärenz gegeben. Mangelnde Kohärenz wird durch unterschiedliches Rückstreuverhalten zwischen zwei Aufnahmen hervorgerufen. Bekannt ist, dass Gebiete die durch starken Bewuchs (Bäume, Büsche, Gras etc.) bedeckt sind, sehr rasch (innert Sekunden bis Minuten) an Kohärenz verlieren. Durch ungeordnete Bewegungen der einzelnen Partialstreuer (Blätter, Äste, Grashalme) zwischen zwei Aufnahmen kann das Rückstreuverhalten massgeblich verändert werden, so dass die Phasendifferenzen zufällig und in der Folge nicht interpretierbar (dekorreliert) sind. Um dekorrelierende Streuer zu vermeiden, werden normalerweise bevorzugt kohärente Oberflächen wie Fels oder künstliche Streuer wie Häuser, Strassen etc. gemessen.

Im Frühjahr 2013 erlitten verschiedene bekannte Rutschgebiete in der Innerschweiz ausserordentliche Beschleunigungsphasen (Hintergraben OW, Beckenried NW, Lauerz SZ). Die genannten Gebiete haben gemeinsam, dass sie an Hängen liegen, die hauptsächlich mit Wiese und Weide bedeckt sind. Infolge der Dekorrelationsproblematik wurden Grashänge bisher noch nicht radarinterferometrisch vermessen. Frühere Beobachtungen mit dem «Gamma Portable Radar Interferometer» (GPRI) zeigten, dass im Gegensatz zu Wald, der jeweils sehr schnell dekorreliert, auch in Wiesen kohärente Messungen durchgeführt werden können, wenn das Aufnahmeintervall kurz ist. Das GPRI ist in der Lage, einen vollen 360° Scan in weniger als einer Minute aufzunehmen.

Die anfangs Mai 2013 aufgetretenen Ver-

schiebungsraten von bis zu 30 cm pro Tag im Gebiet Hintergraben (Medienmitteilung Kanton Obwalden und Gemeinde Sarnen, 1. Mai 2013) lieferten einen gut überwachten Testfall, um die Anwendbarkeit terrestrischer Radarinterferometrie zur Vermessung der Oberflächendeformation in Wiese und Weide zu testen.

Dieser Artikel beschreibt den Messaufbau, die Prozessierung und die Resultate zweier mehrstündiger Messkampagnen, die mit dem GPRI durchgeführt wurden. Dabei werden sowohl die Beobachtungen aus der Kohärenzentwicklung, die daraus resultierenden Konsequenzen für die Prozessierung, als auch die finalen Verschiebungskarten diskutiert.

2 Messkampagne

2.1 Messgerät

Die Messungen wurden mit der zweiten Generation des «Gamma Portable Radar Interferometers» (GPRI) vorgenommen. Das GPRI ist ein 17.2 GHz Radar mit realer Apertur. Die Sensitivität auf Verschiebungen zwischen zwei Aufnahmen unter realen Bedingungen liegt somit in Bereich von Millimetern. Detaillierte Beschreibungen der verwendeten Hardware findet sich in Werner et al. (2012) und eine praxisrelevante Betrachtung terrestrischer Radar-Interferometrie mittels GPRI in Wiesmann & Gruner (2011).

2.2 Messgebiet und Geräteaufbau

Für die Auswahl des Messstandortes steht die Sichtbarkeit des Zielgebietes im Vordergrund. Es sollte so wenig Abschattungen (z. B. durch Hügelkuppen oder Bäume im Vordergrund) wie möglich geben. Weiter muss beachtet werden, dass das GPRI nur die 1-dimensionale (1D) Bewegungskomponente in direkter Blickrichtung misst. Die Blickrichtung sollte folglich parallel zur Rutschungsrichtung liegen. Für die Auswahl des

Standortes wurden Annahmen zur Rutschungsrichtung aus der Hanggeometrie abgeleitet.

Ein Messstandort, der die genannten Bedingungen bestmöglichst erfüllt, wurde bei LK 658'452/188'575, etwas erhöht vom südlichen Seeufer des Sarnersees, beim Standort «Zollhaus» eingerichtet (Fig. 1a). Das Zielgebiet liegt in Schrägdistanzen von ca. 3'100 bis 3'800 m. Die maximale Distanz mit auswertbarer Phase beträgt hier ca. 6'700 m.

Das GPRI wurde auf einem standardisierten Vermessungs-Dreibeinstativ aufgebaut (Fig. 1b) und über einen Asphaltpunkt versichert. Um während der Messung eine genügende Stabilität zu gewährleisten, wurden die Stativbeine mit dem Asphalt verschraubt. Der Aufbau wurde durch eine Person vorgenommen und dauerte ca. 20 Minuten. Bei bereits existierenden Versicherungs- und Verankerungspunkten (bei Folgemessungen) verringert sich die Zeit für den Aufbau auf ca. 10 Minuten.

Das eigentliche Zielgebiet ist in Fig. 1c im Detail dargestellt. Die Oberfläche ist grösstenteils durch Weideland gebildet. Einzelne Gebäude, Büsche und Bäume liegen spärlich verteilt vor. Der Waldstreifen entlang des Schlimbaches ist bei der ersten Messaufnahme bereits gerodet worden (schraffierte Fläche in Fig. 1a).

2.3 Messungen

Erste Messreihe: 6. Mai 2013

Zum Messzeitpunkt waren maximale Grashöhen von ca. 20 cm zu verzeichnen. Das Wetter war wechselhaft bewölkt, jedoch während der ganzen Messreihe trocken. Am Vormittag war es mehrheitlich windstill. Am Nachmittag wehte ein leichter bis mässiger Wind.

Die Aufnahmen erfolgten nach der ersten Messung um 08:30 Uhr im 3-Minuten-Intervall. Um 14:45 Uhr wurde die Messung nach 147 Aufnahmen beendet.

Zweite Messreihe: 28. Mai 2013 mit Vergleichsmessungen

Da die Machbarkeit mit der ersten Messung bestätigt wurde, wurde am 28. Mai 2013 eine weitere Messung ausgeführt. Um die GPRI-Messdaten zu verifizieren, wurde ein kleines Messnetz aus vier Vergleichspunkten eingerichtet, die sowohl mit dem GPRI als auch mit einer Totalstation (Tachymeter Positionierungssystem, TPS) von Leica (Leica TCR803u) im gleichen Zeitraum beobachtet wurden. Als Referenzziele wurden sogenannte «Corner-Reflektoren» aus Aluminium zusätzlich mit einem optischen Rundprisma für die präzise TPS-Vermessung ausgerüstet und jeweils auf einem Dreibeinstativ aufgestellt (Fig. 1). Die Vergleichspunkte befinden sich in Bereichen der Rutschung, die in der ersten Messreihe unterschiedliche Bewegungsraten zeigten. Das TPS-Netz wurde am Nachmittag des 27. Mai installiert und eine Null- sowie nach einer Stunde die erste Folgemessung aufgenommen. Pro Messpunkt wurden in jeder Lage 4 Beobachtungen aufgenommen.

Am 28. Mai 2013 wurde das GPRI frühmorgens wieder über dem in der ersten Messung gesetzten Bodenpunkt aufgebaut. Das Gras im Zielgebiet war innerhalb der drei Wochen auf 0.8-1 m gewachsen und durch den kurz vor Messaufbau gefallenem Regen noch nass. Bei Messbeginn um 06:30 Uhr fiel kein Niederschlag mehr, das Wetter war wechselhaft bewölkt und mehrheitlich windstill. Zwischen 08:00 und 08:45 Uhr gab es wiederum leichten Niederschlag bei leichtem bis mittlerem Wind. Später war es wieder windstill bevor ab ca. 09:45 Uhr der Wind wieder etwas stärker wurde und bis zum Ende der Messung um 16:00 Uhr mässig bis stark blieb.

Das Messintervall wurde wie in der ersten Messung auf drei Minuten festgesetzt. Die Messungen wurden anschliessend vom GPRI autonom aufgenommen. Unterdessen wurden die Referenzpunkte im Zielgebiet in ca. 1.5 h-Intervallen vermessen. Um 16:00 Uhr wurde die GPRI-Messung nach 341 Aufnah-

men gestoppt, wobei ab 15:00 Uhr jeweils Szenen im Minutentakt aufgenommen wurden.

3 Interferometrische Auswertung

Während der Messaufnahmen wurden vereinzelt Interferogramme (Karte der Phasen-

verschiebungen zweier Aufnahmen) sowie Kohärenzkarten (Berechnung der Kohärenz für jede Rasterzelle) zur Qualitätskontrolle berechnet. Die eigentliche Auswertung erfolgte in der Nachprozessierung.

6. Mai 2013

Die Kohärenz der interferometrischen Aufnahmen in der ersten Messreihe war am Vor-

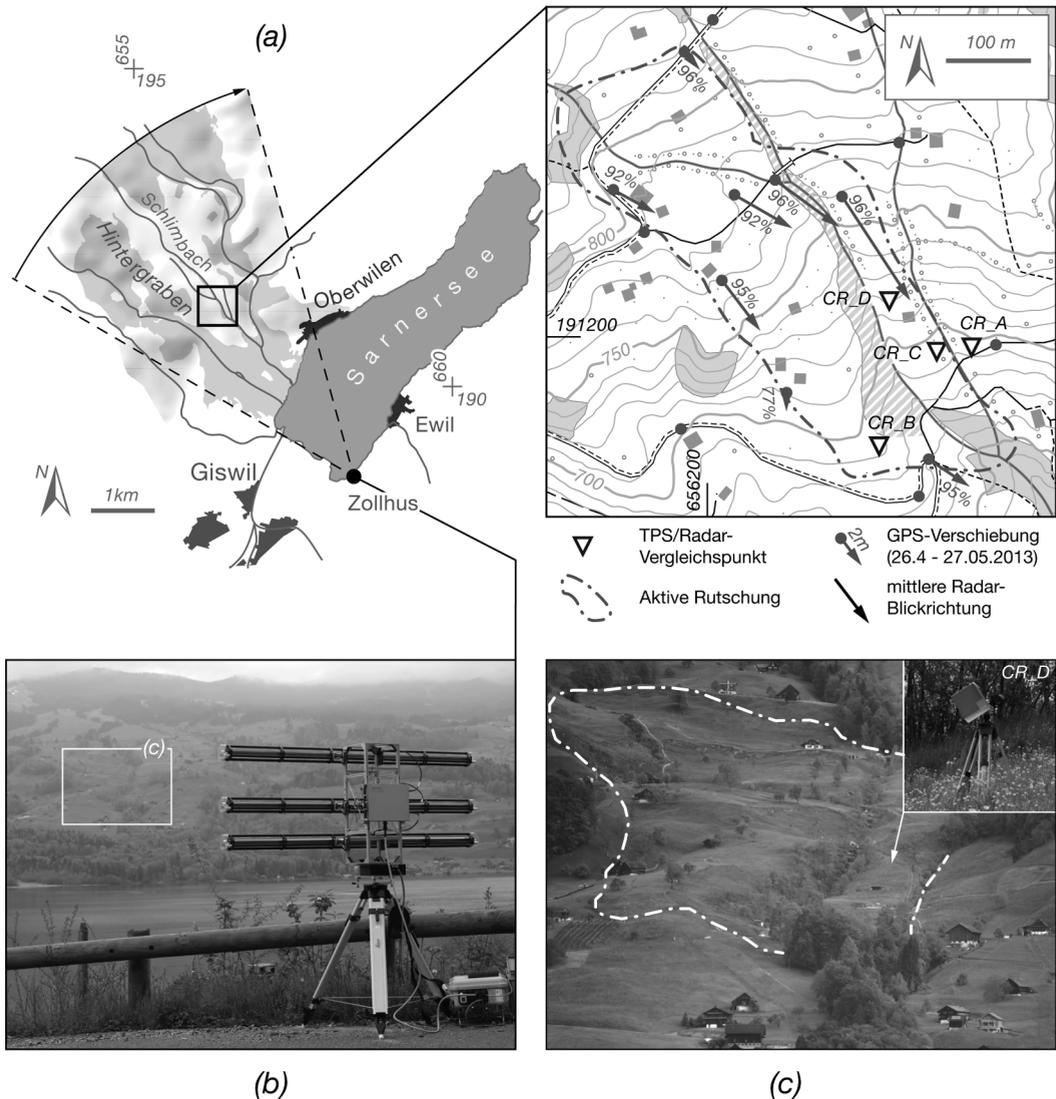


Fig. 1: [a] Übersichts- und Detailkarte (Grunddaten: V25 © swisstopo) mit Messstandort und Messbereich. Die in der Detailkarte angegebenen Verschiebungsvektoren entsprechen den Horizontalverschiebungen der Punktmessungen zwischen 26. April und 27. Mai 2013 (Trigonet 2013). [b] Foto des Messstandortes mit GPRI-Aufbau auf einem geodätischen Dreibeinstativ mit dem Rutschgebiet im Hintergrund. [c] Detailfoto des Rutschgebietes vom Messstandort aus gesehen. Kleines Foto: Referenzpunkt CR_D (Corner-Reflektor und optisches Rundprisma) für die Vergleichsmessung vom 27./28. Mai.

mittag über etwas mehr als eine Stunde lang sehr hoch, sank danach aber in Gebieten, die mit Gras bewachsen waren zusehends. Wie erwartet dekorrelierten Gebiete, die flächenhaft mit Bäumen und Büschen bedeckt sind bereits nach weniger als einer Minute.

Am Nachmittag verringerte sich die Dekorrelationszeit für Wiesen durch den nun aufkommenden Wind auf ca. 10-15 Minuten. Das Messintervall lag mit drei Minuten deutlich unterhalb dieser Zeit, was eine 2D-interferometrische Auswertung ermöglichte.

Nachfolgend wurden zwei leicht verschiedene Ansätze für die Prozessierung gewählt. Der erste verfolgte eine Auswertung der Szenen mit voller Auflösung und ohne Anwendung räumlicher Filter. Die atmosphärischen Einflüsse mussten räumlich nicht modelliert oder korrigiert werden.

Beim zweiten Ansatz wurden die einzelnen Interferogramme räumlich adaptiv gefiltert (ADF), um das Phasenrauschen in Gebieten mit hoher Kohärenz zu reduzieren (Goldstein & Werner 1998). Die ungefilterten wie auch die gefilterten Interferogramme wurden jeweils auf einen als stabil betrachteten Referenzpunkt ausserhalb der Rutschung normalisiert, unwrapped und aufsummiert («Stacking»). Schliesslich wurden die beiden resultierenden Karten, welche die aufsummierten Phasenverschiebungen innerhalb von 6.25 Stunden zeigen, zu Verschiebungen in Radar Blickrichtung pro Tag konvertiert. Gebiete mit geringer Kohärenz (< 0.8) wurden maskiert. Die Verschiebungskarten wurden georeferenziert und sind in Fig. 2 dargestellt.

28. Mai 2013

Zu Beginn der zweiten Messreihe war die Kohärenz über 30 Minuten hinweg noch äusserst stabil. Mit dem Einsetzen einer kurzen Niederschlagsperiode und auffrischendem Wind zwischen ca. 08:00 bis 08:45 Uhr fiel die Kohärenz jedoch lokal bereits nach einigen Minuten ab. Darauf folgte wieder eine stabile Periode mit hoher Kohärenz. Ab 09:45 Uhr bis zum Messende sind die Interferogramme

durch den Wind bedingt jeweils bereits nach drei Minuten wieder stark dekorreliert. Tests vor Ort zeigten, dass bereits nach einer Minute ein starker Kohärenzverlust aufgetreten ist.

Durch die schnelle Dekorrelation wird eine sinnvolle Auswertung aller Szenen mittels 2D Interferometrie verunmöglicht. Alternativ können Verschiebungswerte an einzelnen kohärenten Bildpunkten berechnet werden. Die Methode der «Interferometric Point Target Analysis» (IPTA) (Werner et al. 2003) wird angewendet, wenn die Kohärenz für den gesamten Datensatz nicht genügt, um 2D interferometrisch auszuwerten. Vereinzelte Punkte, die über die gesamte Zeitdauer ein stabiles Rückstreuverhalten aufzeigten, konnten somit mit hoher Präzision ausgewertet werden.

Nachdem das zu erwartende Bewegungsfeld aus der IPTA-Auswertung erkannt wurde, wurden alle konventionellen 3-Minuten-Interferogramme, welche eine genügend hohe Kohärenz aufweisen, für eine 2D-Auswertung ausgewählt. Im Zeitraum zwischen 06:30-09:45 Uhr haben 62 Interferogramme eine ausreichend hohe Kohärenz für ein Interferogramm-Stacking. Um lokales Phasenrauschen zu unterdrücken, wurde ein AD-Filter vor dem Stacking angewendet. Mit Unwrapping wurden die Phasendifferenzen auf Punkt CR_A normalisiert, der als stabile Referenz bestimmt wurde. Die resultierende Verschiebungskarte wurde auf eine 5×5 m Rasterzellengrösse interpoliert, womit sich das Phasenrauschen noch einmal etwas reduzierte.

Fig. 2 zeigt die Resultate der 2D-Interferometrie sowie der IPTA-Auswertung. Wobei die gemessenen Verschiebungen in Blickrichtung jeweils als Tagesgeschwindigkeiten ausgedrückt sind.

4 Resultate

6. Mai 2013

Die Resultate der beiden GPRI-Messkampag-

nen vom 6. und 28. Mai 2013 sind in Fig. 2 zusammengefasst dargestellt. Die 2D-interferometrische Auswertung der Messreihe vom 6. Mai zeigt ein beinahe lückenloses Bild des Deformationsfeldes der Rutschung. Die wenigen weiss maskierten Flächen sind dekorrelierte Gebiete, die auf Wald oder grössere Baumgruppen zurückzuführen sind oder Gebiete, die im Radarschatten liegen. Die ungefilterte Auswertung zeigt 1D-Bewegungen in Radar-Blickrichtung von bis zu 40 cm/Tag. Diese sind aber nur an vereinzelt Punkten zu verzeichnen. Nebst diesen einzelnen Punkten wurden räumlich signifikante Bewegungsraten von 35 cm/Tag gemessen. In der räumlich gefilterten und auf 5 m Rasterzellengrösse skalierten Verschiebungskarte ist das Rauschen deutlich reduziert. Die maximalen Bewegungsraten werden dadurch etwas gedämpft, die Zonierung der Bewegungsgeschwindigkeit ist im gefilterten Bild jedoch deutlicher erkennbar. Da durch das räumliche Filtern auch starke Bewegungskontraste gedämpft werden, ist die seitliche Begrenzung als gradueller Übergang erkennbar. In der ungefilterten Bewegungskarte zeigt sich der scharfe Übergang zum nicht bewegten Gebiet vor allem in der östlichen Begrenzung.

28. Mai 2013

Auch die Resultate der zweiten Messreihe zeigen signifikante Rutschbewegungen. Die IPTA-Prozessierung über den gesamten Messzeitraum und die 2D-Interferometrie im verkürzten Messzeitraum am Vormittag zeigen ein ähnliches Bild der Bewegung. Zwei Zonen erfahren Bewegungen von über 5 cm pro Tag. Flächen mit geringeren Geschwindigkeiten sind nicht klar voneinander abtrennbar und liegen stellenweise unter der Signifikanzgrenze der Messreihe (bei ca. 2 cm/Tag). Die maximalen Bewegungen werden nur mittels 2D-Interferometrie beobachtet und liegen ca. 20 m oberhalb dem Vergleichspunkt CR_D im Hang. Die Bewegungsfelder der ersten und der zweiten Messreihe entsprechen einander in ihrer räumlichen

Verteilung und in den relativen Geschwindigkeiten grösstenteils.

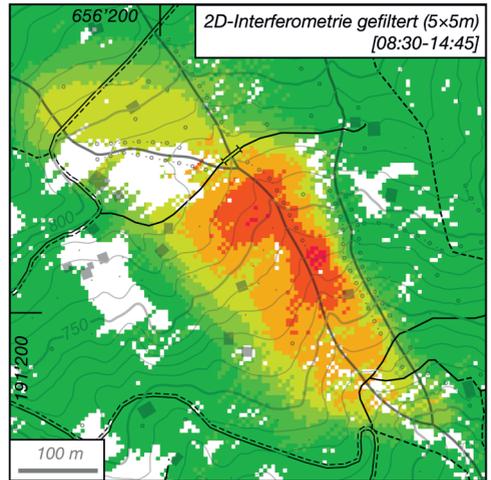
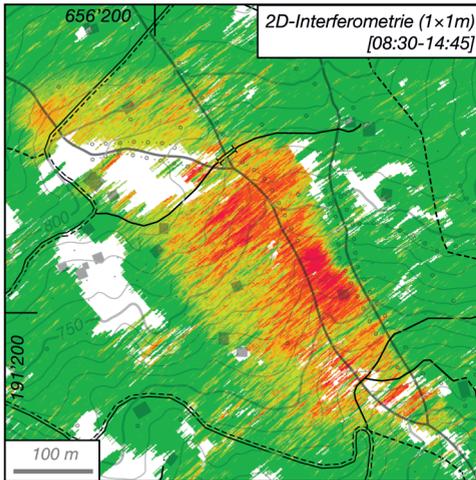
Vergleichsmessungen

Die Zeitreihenauswertung der TPS-Beobachtungen und der Radar-Messungen an den Referenzreflektoren sind in Fig. 3 dargestellt. Für den direkten Vergleich wurden die mittels TPS ermittelten Gesamtverschiebungen (3D) in 1D-Blickrichtungsverschiebungen zum Radar umgerechnet. In der kurzen Beobachtungsdauer wurde die Bewegung als linear angenommen. Die Tagesgeschwindigkeiten (v) wurden über die Steigung der Regressionsgeraden bestimmt. Es ist jeweils der Standardfehler (σ) zur Regression angegeben (Fig. 3).

In der mittels Radar bestimmten Zeitreihe der Verschiebung ist zwischen ca. 11:18-13:48 Uhr bei allen Vergleichspunkten eine windstille Periode mit sehr geringen Schwankungen der Messwerte zu erkennen. Für diese Periode wurde die Regression und der Standardfehler separat berechnet und in Fig. 3 in eckiger Klammer angegeben. Ein direkter Vergleich der 1D-Verschiebungen der Referenzpunkte zeigt Mittelwertabweichungen der beiden Methoden von maximal 13 mm/Tag für die gesamte Beobachtungsdauer. Für den Abschnitt zwischen 11:18-13:48 Uhr ergibt sich eine maximale Mittelwertabweichung von 0.5 mm.

5 Diskussion

Die Resultate der beiden Kampagnen zeichnen das Bewegungsfeld während der Beobachtungszeit aus grosser Distanz sehr präzise nach. Die morphologischen Feldbefunde beispielsweise entsprechen den Befunden aus der ungefilterten Auswertung vom 6. Mai (Fig. 2), die eine scharfe Abgrenzung innerhalb weniger Meter zwischen deformiertem und undeformiertem Gebiet zeigen. Die Bewegungssensitivität in Blickrichtung (Anteil der gemessenen 1D-Verschiebung an der totalen 3D-Verschiebung) ist durchge-



6. Mai 2013

2D Interferometrie



Gemessene 1D
Verschiebungsraten pro Tag

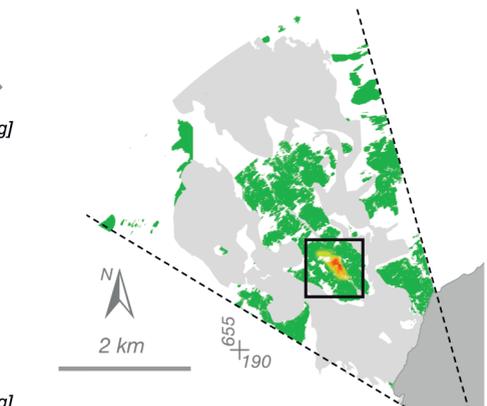
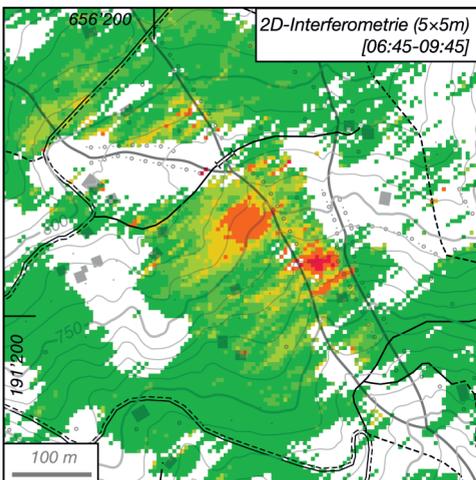
□ Dekorrelierte Bereiche oder Gebiete im
Radar-Schatten ohne Verschiebungsangaben

2D Interferometrie



IPTA

28. Mai 2013



▽ TPS/Radar-
Vergleichspunkt
(27./28.05.2013)

↙ mittlere Radar-
Blickrichtung

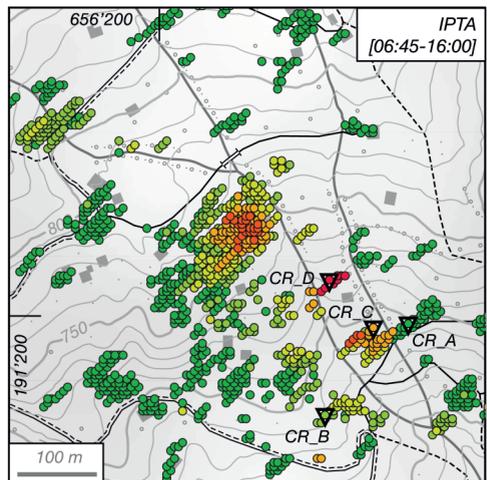


Fig. 2: Karten der gemessenen Bewegungsraten in Radar-Blickrichtung. Positive Werte zeigen Bewegung zum Radar hin an. Achtung: unterschiedliche Farbskalierungen der Karten vom 6. und vom 28. Mai. Details zur Kartenerstellung sind dem Kapitel «Interferometrische Prozessierung» zu entnehmen.

hend hoch (88-96%, vgl. Fig. 1a und Fig. 3) mit Ausnahme der unteren westlichen Begrenzung, wo eine Sensitivität von 77% zu verzeichnen war.

Die Kohärenzentwicklung in niedrigem Gras ist bei Windeinwirkung stabiler als in hohem Gras, so dass über eine längere Zeitdauer ununterbrochen kohärent gemessen werden konnte. Bei hohem Grasbewuchs zeigte sich, dass sobald nur schwacher bis mässiger Wind aufkommt, die interferometrischen Beobachtungen sehr rasch dekorrelieren. Sogar mit der äusserst hohen Repetitionsrate des GPRI (1 Min.) können unter diesen Bedingungen keine kohärenten Beobachtungen mehr gemacht werden.

Der atmosphärische Einfluss auf die Wellenlaufzeit des Signals zeigt sich in leichten Phasendifferenzen. Diese sind in der Gesamtverschiebung enthalten, wenn keine Atmosphärenkorrektur vorgenommen wird. Deutlich zu erkennen sind Intervalle mit unterschiedlichem atmosphärischem Einfluss in Fig. 3 rechts. Die Zeitreihen mit etwas grösserem Standardfehler deuten stärkere atmosphärische Effekte an. Die erste unruhige Phase

(09:30-11:18 Uhr) nach einer kurzen und leichten Niederschlagsperiode von ca. 45 Minuten Dauer hat ein Standardfehler von max. 2 mm bewirkt. Nach dieser Phase war es stark wechselhaft mit abwechslungsweise Sonne und Nebelschwaden und auffrischem, leicht böigem Wind.

Später war es im ganzen Gebiet sonnig und es wehte ein mehrheitlich konstanter Wind. In dieser Zeit (11:18-13:48 Uhr) zeigten die Radar-Beobachtungen der Referenzpunkte mit max. 0.6 mm den geringsten Standardfehler. Ab 13:48 Uhr wurde es wieder wechselhaft und der Wind wurde stärker, was sich auch im Standardfehler zeigte.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass auf die grosse Beobachtungsdistanz zwar relativ starke atmosphärische Einflüsse vor allem bei wechselhaften Bedingungen auftraten (vgl. Caduff et al. 2013), diese sind jedoch identifizierbar und können mittels redundanter Beobachtungen minimiert werden.

Wechselhafte Bedingungen und hohes Gras erlauben momentan keine Echtzeit-Auswertung. Die Nachprozessierung muss auf die

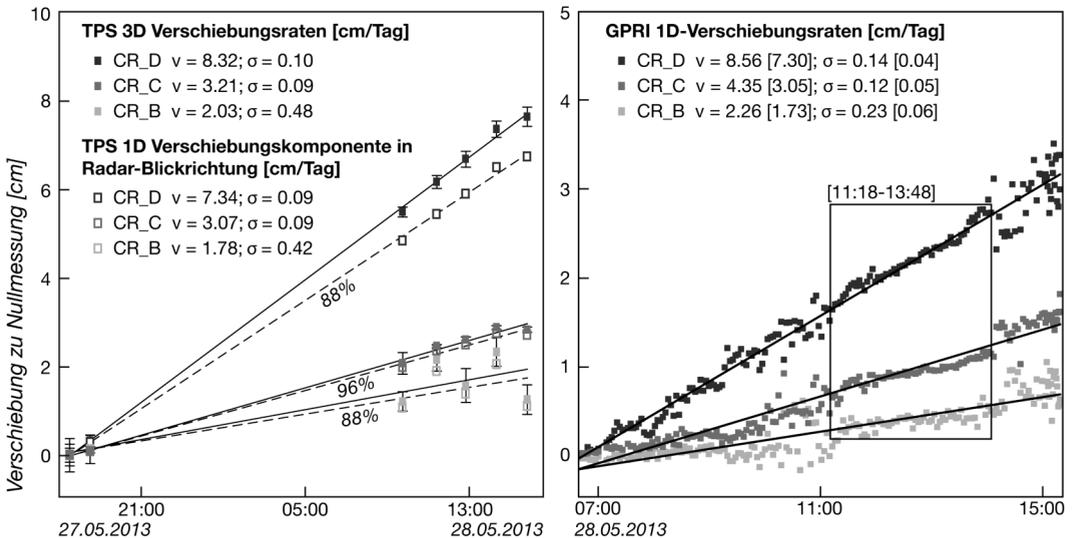


Fig. 3: Zeitliche Entwicklung der Verschiebung der drei Kontrollpunkte. Links: tachymetrische Gesamtverschiebung (TPS) und daraus berechneter Bewegungsbeitrag in Radar-Blickrichtung. Rechts: Mittels Interferometrischer Punktanalyse (IPTA) bestimmte Verschiebungen. Die in eckiger Klammer angegebenen Werte für die Geschwindigkeit (v) und den Standardfehler (σ) sind für den Zeitraum (11:18-13:48 Uhr) gesondert berechnet.

jeweiligen Bedingungen angepasst und mittels einer Auswahl von geeigneten (kohärenten) Szenen durchgeführt werden.

6 Schlussfolgerungen

Fallspezifische Folgerungen

- Die Resultate der Messungen vom 6. Mai 2013 zeigen die Ausdehnung der von der Rutschung betroffenen Fläche, sowie die lokalen Bewegungsmaxima der Bewegungen in Blickrichtung des Radars bis 35 cm (3D-korrigiert bis 40 cm) der Rutschung Hintergraben.
- Die maximale Bewegungsrate der Rutschung Hintergraben hat innerhalb von 3 Wochen von max. 40 cm/Tag auf 10 cm/Tag abgenommen.
- Obwohl nur eindimensionale Bewegungsraten gemessen werden können, wurden durch eine gute Standortwahl 77-96% der Gesamtbewegung erfasst.

Methodische Folgerungen

- Messungen der Verschiebung in Blickrichtung sind mit dem GPRI in grossen Distanzen (hier bis 6.7 km) möglich.
- Rutschungsbedingte kontinuierliche Deformation konnte bei niedrigem Gras mit einer Signifikanzgrenze von ca. 1 cm/Tag Geschwindigkeit bestimmt werden. Der Windeinfluss auf die Kohärenz ist relativ gering, wenn in kurzen Intervallen gemessen wird.
- Hohes Gras (80-100 cm) hat nur bei windstillen Verhältnissen die für die Radar-Interferometrie wichtige hohe Kohärenz. Bei genügend langer Aufnahme (3 h à 3 Minuten-Intervall-Beobachtungen) können Bewegungen von natürlichen Streuern ab ca. 3 cm/Tag von anderen, Vegetations- und Atmosphären-bedingten Störungen erkannt werden.
- Die rutschungsbedingte Oberflächendeformation kann mit 2D-Interferometrie in kohärenten Gebieten flächendeckend erfasst werden.

- Mittels interferometrischer Punktanalyse (IPTA) lässt sich die gesamte Zeitreihe mit hoher Präzision (ca. 2 mm) bestimmen.
- Wechselhafte Atmosphärische Bedingungen erhöhen die Streuung der Einzelbeobachtungen, diese liegen jedoch deutlich unterhalb der Bewegungsraten und lassen sich durch zeitliches Filtern minimieren.
- Zu jetzigem Zeitpunkt ist eine automatische Auswertung in Echtzeit bei wechselhaften Bedingungen bei hohem Grasbewuchs nicht möglich. Die Herstellung von Deformationskarten setzt Erfahrung im Umgang mit dekorrelierenden Streuern voraus. Im vorliegenden Fall liess sich das Bewegungsmuster innert weniger Stunden bestimmen.

Dank

Wir danken der Abteilung Naturgefahren des Kantons Obwalden, namentlich Urs Hunziker, für die organisatorische Unterstützung. Die Abteilung Naturgefahren hat uns zudem freundlicherweise die Daten der monatlichen Kontrollmessungen zum Vergleich zur Verfügung gestellt.

Literatur

- Caduff, R., Kos, A., Schlunegger, F., McArdell, B. & Wiesmann, A. 2013: Terrestrial Radar Interferometric Measurement of Hillslope Deformation and Atmospheric Disturbances in the Illgraben Debris-Flow Catchment, Switzerland. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 1–5. DOI:10.1109/LGRS.2013.2264564.
- Caduff, R. 2013: Terrestrische Radar-Interferometrie in erdwissenschaftlichen Anwendungen, Theorie und Beispiele / Terrestrial Radar-Interferometry for Change Detection in Geosciences. Dissertation Universität Bern, Bern.
- Goldstein, R. M. & Werner, C. L. 1998: Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25, 4035–4038.
- Kanton Obwalden & Gemeinde Sarnen: Ausserordentliches Ereignis Rutschung Hintergraben, Stalden. Medienmitteilung, 1. Mai 2013.
- Trigonet 2013: Deformationsmessungen Gebiet Hintergraben. Unpublizierte Messungen. 27. Mai 2013.
- Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T. & Wiesmann, A. 2003: Interferometric point target analysis for deformation mapping. *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*. 7, 4362–4364.
- Werner, C., Wiesmann, A., Strozzi, T., Kos, A., Caduff, R. & Wegmüller, U. 2012: The GPRI multi-mode differential interferometric radar for ground-based observations. *Synthetic Aperture Radar, 2012. EUSAR. 9th European Conference*, 304–307.
- Wiesmann, A. & Gruner, U. 2011: Radar-Interferometrie im Einsatz für die Stabilitätsüberwachung von grossflächigen Felswänden. *Bulletin für angewandte Geologie*, 16/1, 51–55.