

Überwachung von Hangbewegungen mittels Radarinterferometrie – Methoden zur objektiven Überprüfung der Anwendbarkeit

Monitoring of landslides by means of radar interferometry – methods for objective feasibility
assessment

Simon Plank¹, John Singer², Kuroschi Thuro³

¹ Dr.-Ing. Simon Plank, MSc (GIS), Fachgebiet Hangbewegungen & Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, simon.plank@mytum.de

² Dr.rer.nat. John Singer, Engineering Geology, ETH Zürich, john.singer@erdw.ethz.ch

³ Prof. Dr.rer.nat. Kuroschi Thuro, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, thuro@tum.de

Zusammenfassung

Differentielle Radarinterferometrie (D-InSAR) ermöglicht eine millimetergenaue Überwachung von Hangbewegungen. Die nachfolgend genannten Faktoren erschweren jedoch ihre Anwendbarkeit. (I) Die radarspezifische Aufnahmegeometrie hat zur Folge, dass Abschattungen in Bereichen hinter steilen Bergen (kein Radarsignal, Shadow) auftreten. In anderen Bereichen kommt es zu Überlagerung verschiedener Radarechos (Layover). Diese Effekte verhindern eine Anwendung von D-InSAR. (II) Auch eine dichte Vegetationsbedeckung der Hangbewegung erschwert die Anwendung der Radarinterferometrie. (III) Bei dem weiter entwickelten Verfahren der Persistent Scatterer Radarinterferometrie (PSI) werden mindestens 15 bis 50 Radaraufnahmen benötigt, wodurch die Prozessierung sehr zeitaufwändig und teuer wird. Eine erfolgreiche Anwendung von PSI setzt eine ausreichend hohe Anzahl an Messpunkten (sogenannte Persistent Scatterers – PS) voraus. Das sind Streuer mit langzeitlich hohen Kohärenzwerten. Anhand eines Fallbeispiels in den Öztaler Alpen, werden kostengünstige Methoden zur objektiven Anwendbarkeitsprüfung von D-InSAR und PSI zur Überwachung von Hangbewegungen präsentiert – bevor die Radaraufnahmen in Auftrag gegeben werden.

Schlüsselworte: Hangbewegungen, Radarinterferometrie, Anwendbarkeitsprüfung, Öztaler Alpen

Abstract

Differential radar interferometry (D-InSAR) enables accuracies of millimeters for landslide monitoring. However, the following factors complicate its application. (I) The radar specific imaging geometry causes shadowing behind steep mountains (the satellites receives no signal). Other areas are affected by overlay of different radar signals (layover). These effects inhibit the application of radar interferometry. (II) Moreover, also the land cover of the landslide has a very high influence on the applicability of radar interferometry. (III) The more advanced technique persistent scatterer interferometry (PSI) requires a stack of at least 15 to 50 radar images, which makes processing very time-consuming and expensive. Precondition of successful PSI application is a high enough number of measurement points (so-called persistent scatterers – PS). PS are scatterers of longterm high coherence values. This article presents on the basis of a case study in the Ötztal Alps the application of low-cost methods to enable objective pre-survey feasibility assessment of D-InSAR and PSI – prior to recording of the area of interest. (I) The simulation of layover and shadow areas and the calculation of the part of movement measurable by D-InSAR enable beforehand the determination of the best suited imaging parameters for monitoring of a specific landslide. (II) Classification of the land cover regarding its influence on the applicability of D-InSAR enables the selection of the optimal radar sensor for a specific landslide. (III) Furthermore, a method for PS estimation prior to radar recording of the area of interest is presented. This method is based on freely available geodata and enables the user to test whether there would be enough PS to monitor a certain landslide by means of PSI.

Keywords: Landslides, radar interferometry, feasibility assessment, Ötztal Alps

1 Einleitung

Mit den aktiven Fernerkundungsmethoden der differentiellen Radarinterferometrie (D-InSAR) und ihrer Weiterentwicklung, der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) ist eine millimetergenaue Überwachung von Hangbewegungen möglich (FRUNEAU et al. 1996, SQUARZONI et al. 2003, CATANI et al. 2005, COLESANTI & WASOWSKI 2006). In FERRETTI et al. (2000b, 2001) und in KAMPES (2006) finden sich detaillierte Beschreibungen der D-InSAR und PSI

Methoden. Die nachfolgend genannten Faktoren erschweren jedoch die Anwendbarkeit dieser Fernerkundungsmethoden. (I) Die radarspezifische Aufnahmegeometrie hat zur Folge, dass Abschattungen in Bereichen hinter steilen Bergen (kein Radarsignal, Shadow) auftreten. In anderen Bereichen kommt es zu Überlagerung verschiedener Radarechos (Layover). Diese Effekte verhindern eine Anwendung der D-InSAR Methode (BARBIERI & LICHTENEGGER 2005, COLESANTI & WASOWSKI 2006, LILLESAND & KIEFER 2007). (II) Auch eine dichte Vegetationsbedeckung der Hangbe-



wegung erschwert die Anwendung der Radarinterferometrie (WEGMÜLLER & WERNER 1995, BAMLER & HARTL 1998, COLESANTI & WASOWSKI 2006, LU 2007, AHMED et al. 2011, CARTUS et al. 2011). (III) Nach FERRETTI et al. (2000a), COLESANTI et al. (2003), HANSEN (2005) und CROSETTO et al. (2010) werden beim PSI Verfahren mindestens 15 bis 50 Radaraufnahmen benötigt, wodurch die Prozessierung sehr zeitaufwändig und teuer wird. Eine erfolgreiche Anwendung der PSI Methode setzt eine ausreichend hohe Anzahl an Messpunkten (sog. Persistent Scatterers PS) voraus. Das sind Streuer mit langzeitlich hohen Kohärenzwerten. Aber bisher ist es sehr schwer vor der Aufnahme und Prozessierung mehrerer Radaraufnahmen die Anzahl der PS und ihre Verteilung abzuschätzen (COLESANTI & WASOWSKI 2006).

Anhand eines Fallbeispiels in den Öztaler Alpen, werden kostengünstige Methoden zur objektiven Anwendbarkeitsprüfung von D-InSAR und PSI zur Überwachung von Hangbewegungen präsentiert – bevor die Radaraufnahmen in Auftrag gegeben werden. (I) Mittels einer in PLANK et al. (2012a) entwickelten Simulation von Layover und Shadow und der Berechnung des Bewegungsanteils einer Hangbewegung, der geometriebedingt vom Satelliten aus erfasst werden kann, können vorab die optimalen Aufnahmeparameter bestimmt werden. (II) Eine Klassifikation der Landbedeckung bezüglich ihres Einflusses auf die Anwendbarkeit des D-InSAR Verfahrens ermöglicht die Wahl des optimalen Radarsensors für eine bestimmte Hangbewegung. (III) Des Weiteren wird eine Methode präsentiert, die es ermöglicht, basierend auf frei verfügbaren Geodaten, vor einer Radaraufnahme zu überprüfen, ob für eine bestimmte Hangbewegung die Dichte der zu erwartenden PS ausreichend hoch für eine Anwendung des PSI Verfahrens ist (PLANK et al. 2012b).

2 Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Die Simulationen wurden im Aufnahmegebiet einer echten TerraSAR-X Radaraufnahme durchgeführt (s. Abb. 1) (Aufnahmemodus: StripMap (006); Flugrichtung: Descending; Blickrichtung: rechts; relativer Orbit: 78; Incidence angle: $26,80^\circ - 30,67^\circ$). Die Aufnahme deckt ein Gebiet in den Öztaler Alpen im Grenzgebiet von Österreich und Italien ab. Das Untersuchungsgebiet umfasst Teile des Öztals, das Pitztal, das Kaunertal und Teile des Oberinntals. Das ca. 45 km mal 35 km große Gebiet erstreckt sich von Landeck (im NW) und Längenfeld (NE) bis zum Reschersee (SW) und Vernagt Stausee (SE).

3 Aufnahmegeometrie und topographisches Relief des Untersuchungsgebiets

3.1 Simulation von Layover und Shadow

Nach BARBIERI & LICHTENEGGER (2005), COLESANTI & WASOWSKI (2006) und LILLESAND & KIEFER (2007) kann die D-InSAR Methode nicht in Bereichen angewandt werden, die von Layover und oder Shadow betroffen sind. Folglich ist es sehr wichtig bereits vor einer teuren Radaraufnahme zu wissen, ob eine bestimmte Hangbewegung von diesen Störeffekten betroffen sein wird. Um diese Bereiche abschätzen zu können und um vor einer Radaraufnahme die

optimalen Aufnahmeparameter zur Untersuchung einer bestimmten Massenbewegung bestimmen zu können, wurde in PLANK et al. (2012a) eine Layover-Shadow-Simulation basierend auf einem Geoinformationssystem entwickelt. Die Grundlage der Simulation bildet ein digitales Geländemodell (DGM) des Interessensgebiets. Es sei an dieser Stelle auf die freiverfügbaren Shuttle Radar Topography Mission DGMS hingewiesen (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Aufgrund des großen topographischen Reliefs treten großflächig geometrische Störungen im Radarbild des Testgebiets auf. Abbildung 1 zeigt eine große Layover Abdeckung im Untersuchungsgebiet. Dagegen liegen nur sehr kleine Flächen im Bereich von Shadow. Ursache hierfür ist der relativ steile Aufnahmewinkel des simulierten Satelliten (ca. 28°). Da es sich um einen Descending Orbit handelt (Blickrichtung des Satelliten: Ost-West), sind die Westflanken der Täler von Layover betroffen. Folglich können bei der gewählten Aufnahmegeometrie nur die Ostflanken mittels der konventionellen D-InSAR Methode überwacht werden. Um auch ein Monitoring der Westflanken durchführen zu können, muss das Untersuchungsgebiet von einem Ascending Orbit (Sensorblickrichtung: West-Ost) aufgenommen werden. Eine hier nicht dargestellte Simulation für einen Ascending Orbit zeigte eine starke Layover Abdeckung der Osthänge.

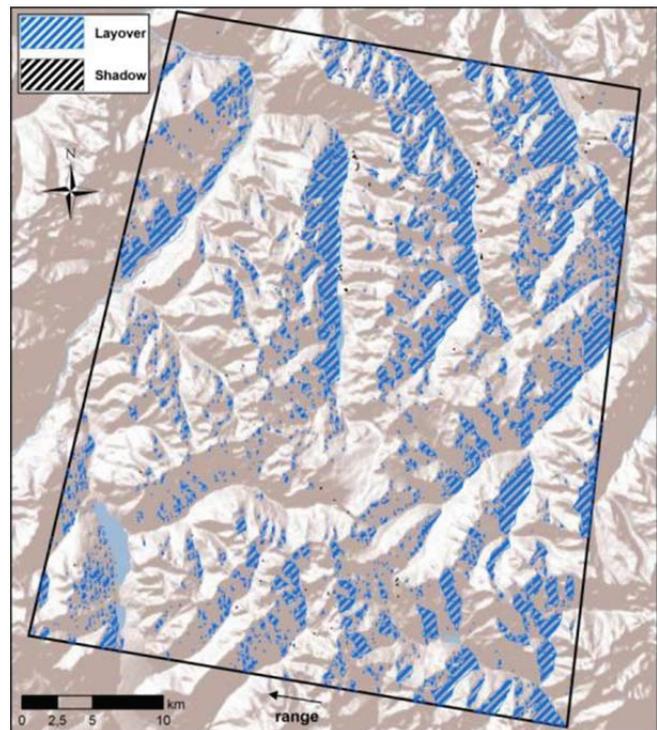


Abb. 1: Layover-Shadow-Simulation eines Gebiets in den Öztaler Alpen. Aufgrund des steilen Aufnahmewinkels (ca. 28°) sind große Bereiche von Layover betroffen. Range = Blickrichtung des Radarsensors. Hintergrund: © ESRI world shaded relief.

Fig. 1: Layover-shadow-simulation of a site in the Ötztal Alps. Due to the steep incidence angle (ca. 28°), large areas are affected by layover. Range = looking direction of the radar sensor. Background: © ESRI world shaded relief.

Um den Einfluss von Layover und Shadow Bereichen möglichst klein zu halten, wäre ein Aufnahmewinkel von 45° optimal. Bei flacheren Aufnahmewinkeln würden größere Bereiche im Radarschatten liegen. Der Vorteil der weiter-

entwickelten PSI Methode ist, dass diese prinzipiell auch in Layover Bereichen angewendet werden kann.

3.2 Mit D-InSAR messbarer Bewegungsanteil

Abbildung 2 zeigt neben der Layover-Shadow-Simulation (vgl. Abb. 1) die Berechnung des sogenannten messbaren Bewegungsanteils. Das ist der Anteil an einer möglichen Bewegung am Erdboden (wie z.B. einer Hangbewegung), der mittels D-InSAR erfasst werden kann. Radarsensoren können Deformationen am Erdboden nur in Blickrichtung des Sensors erfassen. Bewegungen in Flugrichtung des Satelliten / Flugzeugs (= senkrecht zur Blickrichtung) können nicht erfasst werden. Da die meisten ‚Low Orbit‘ Erdbeobachtungssatelliten (Flughöhe < 2000 km) einen sogenannten ‚near polar orbit‘ fliegen (nahezu Nord-Süd), können im Allgemeinen vor allem Ost-West gerichtete Bewegungen am Erdboden sehr gut mittels D-InSAR erfasst werden. Da im Untersuchungsgebiet der Ötztaler Alpen Nord-Süd gerichtete Täler überwiegen, können hier sehr gut mögliche Hangbewegungen an den Ost- und Westtalflanken mit den Methoden der Radarinterferometrie überwacht werden. Für eine genaue Beschreibung zur Berechnung des messbaren Bewegungsanteils sei auf PLANK et al. (2012a) verwiesen.

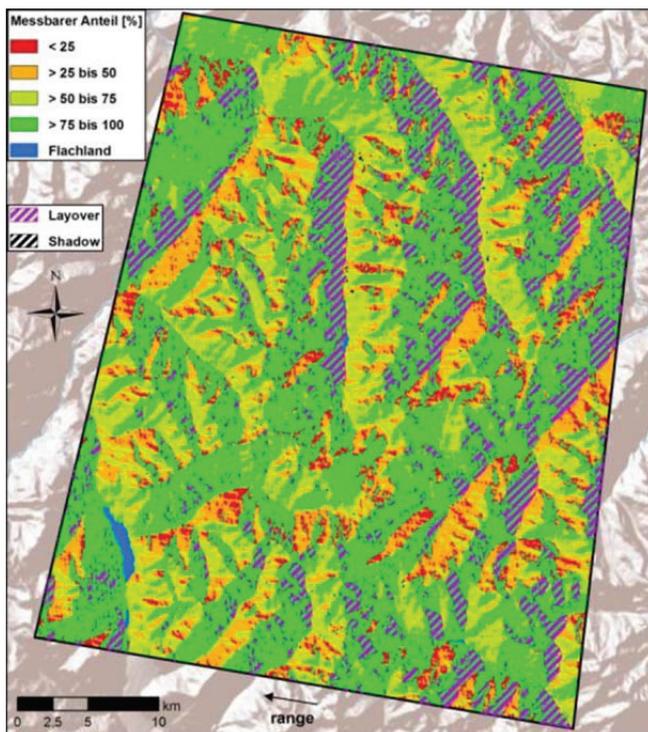


Abb. 2: Layover-Shadow-Simulation und Berechnung des messbaren prozentualen Bewegungsanteils für das Testgebiet. Range = Blickrichtung des Radarsensors. Hintergrund: © ESRI world shaded relief.

Fig. 2: Layover-shadow-simulation and calculation of the measurable percentage of movement of the site. Range = looking direction of the radar sensor. Background: © ESRI world shaded relief.

4 Einfluss der Landbedeckung

Für D-InSAR Anwendungen können nur Interferogramme mit genügend hohen Kohärenzwerten genutzt werden.

Durch Veränderungen am Erdboden in der Zeit zwischen den Radaraufnahmen wird die Kohärenz reduziert (COLESANTI & WASOWSKI 2006). Regionen mit nur einer sehr geringen Vegetationsbedeckung wie Fels oder Siedlungsflächen zeigen hohe Kohärenzwerte (FRUNEAU et al. 1996 und LU 2007), während Bereiche mit dichter Vegetation wie zum Beispiel Wald niedrige Kohärenzwerte aufweisen (verursacht durch Wind und Pflanzenwachstum; WEGMÜLLER & WERNER 1995, BAMLER & HARTL 1998, AHMED et al. 2011). Die Kohärenz (und damit die Anwendbarkeit von D-InSAR) wird also sehr stark von der Landbedeckung des Untersuchungsgebiets beeinflusst. Des Weiteren hat auch die Wellenlänge des Radarsensors einen großen Einfluss (BAMLER & HARTL 1998 und BARBIERI & LICHTENEGGER 2005). Deshalb wurde in PLANK et al. (2012a) eine Klassifikation der Hauptlandbedeckungsarten bezüglich ihres Einflusses auf die Anwendbarkeit des D-InSAR Verfahrens in Abhängigkeit von der Radarwellenlänge (X-Band: Wellenlänge $\lambda \sim 3,1$ cm; C-Band: $\lambda \sim 5,6$ cm; L-Band: $\lambda \sim 23,6$ cm) entwickelt. Die Skala der Klassifikation reicht von 1 (sehr gute Anwendbarkeit von D-InSAR) bis 6 (D-InSAR kann nicht angewendet werden). Für das Untersuchungsgebiet der Ötztaler Alpen wurde diese Klassifikation auf den europaweit verfügbaren Coordination of Information on the Environment (CORINE) 2006 Landbedeckungsdatensatz (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-1>) angewandt (s. Abb. 3).

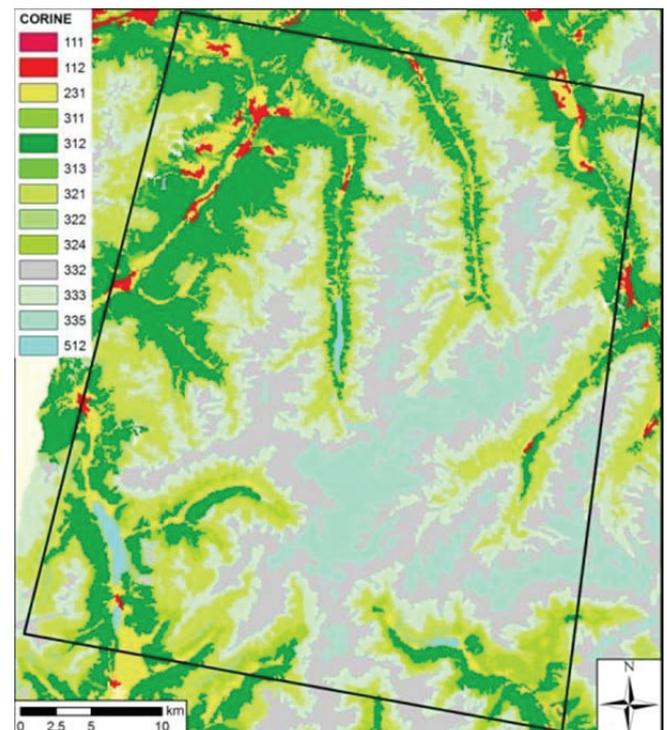


Abb.3 : CORINE 2006 Landbedeckung des Untersuchungsgebiets (111, 112: Siedlungsfläche; 231, 321: Grasland; 311, 312, 313: Wald; 322: Moor; 324: Übergang Wald- Buschland; 333: spärliche Vegetation; 332: Fels; 335: Gletscher; 512: Wasser).

Fig. 3: CORINE 2006 land cover of the site (111, 112: urban area; 231, 321 grassland; 311, 312, 313: forest; 322: moor; 324: transitional woodland/shrub; 333: sparse vegetation; 332: rocks; 335: glacier; 512: water).



Abbildung 4 zeigt die Klassifikation für einen X-Band Radarsensor. Aufgrund der kurzen Wellenlänge kann das D-InSAR Verfahren nicht im Wald angewendet werden (Klasse 6). Folglich kann vor allem der tiefer gelegene Bereich der Talflanken nur vereinzelt mittels D-InSAR überwacht werden. Im Talboden selbst überwiegen Weideflächen (Klasse 4) und Siedlungsflächen (Klasse 1). Hier kann D-InSAR relativ gut bis sehr gut angewendet werden. In den Regionen oberhalb der Baumgrenze steigt die Anwendbarkeit von D-InSAR mit abnehmender Vegetationsdichte von Grasland (Klasse 4), spärlicher Vegetation (Klasse 3) bis zu Felsregionen (Klasse 2). Gletscher können prinzipiell mit D-InSAR überwacht werden. Jedoch nimmt die Kohärenz durch die Akkumulation und das Schmelzen von Schnee und Eis innerhalb weniger Tage sehr stark ab. Deshalb können Gletscher nur bei günstigen Satellitenkonstellationen bzw. nur mittels modernerer Missionen (wie COSMO-SkyMed) mit höheren Überflugfrequenzen überwacht werden. Da die hier angewandte Klassifikation des Einflusses der Landbedeckung auf D-InSAR aber bzgl. langsamer Hangbewegungen entwickelt wurde – für deren Überwachung die herkömmlichen Satellitenmissionen verwendet werden können (Überflugfrequenzen von 11 Tagen (TerraSAR-X) bis zu 35 Tagen (ERS und ENVISAT) oder sogar 46 Tage (ALOS PALSAR) – erhält die Landbedeckungskategorie Gletscher die Einstufungsstufe 6.

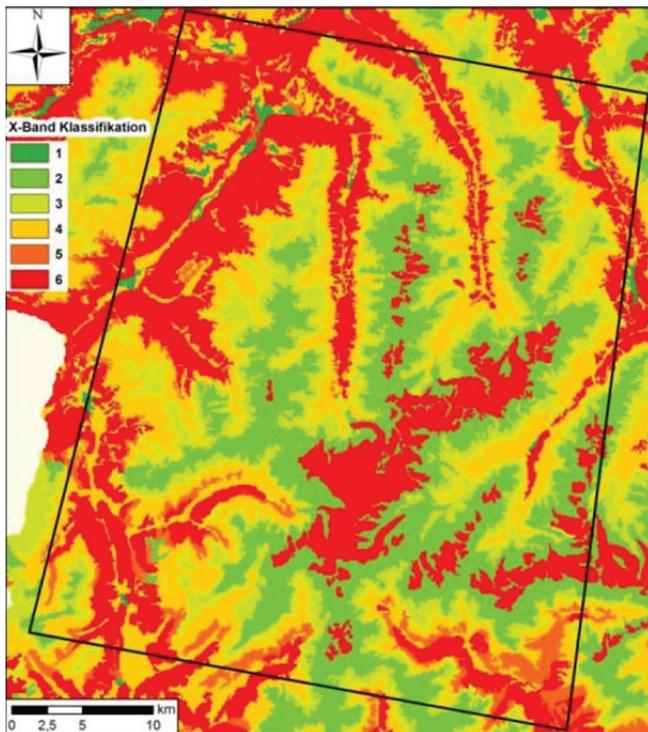


Abb. 4: Klassifikation des Einflusses der Landbedeckung für einen X-Band Radarsensor.

Fig. 4: Classification of the land cover's influence for an X-band radar sensor.

Die Klassifikation des C-Bandes (s. Abb. 5) zeigt aufgrund der nur leicht größeren Wellenlänge ein ähnliches Ergebnis wie die Klassifikation des oben beschriebenen X-Bandes. Vor allem in den höheren Regionen oberhalb der Baumgrenze in Bereichen mit niedrigerer Vegetation zeigt sich

die bessere Anwendbarkeit eines C-Band Sensors (höhere Kohärenzwerte über längere Zeiträume) als im X-Band.

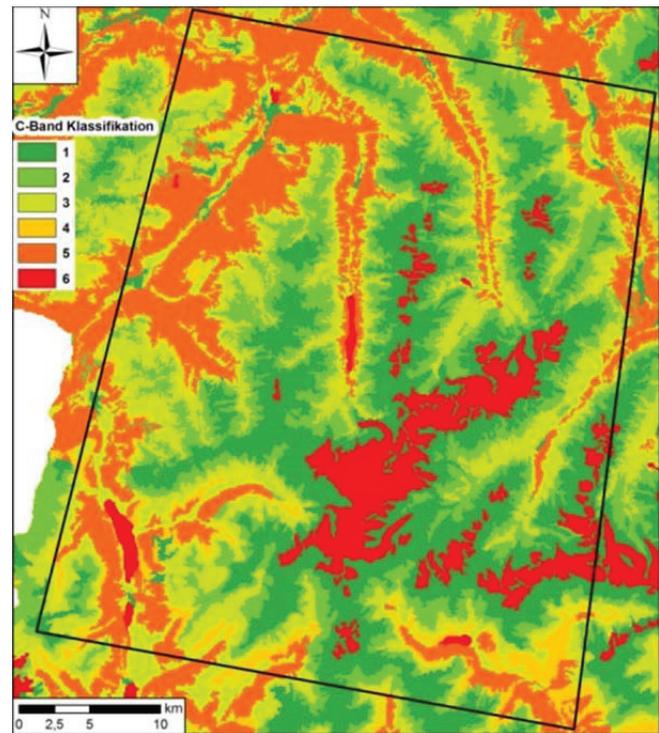


Abb. 5: Klassifikation des Einflusses der Landbedeckung für einen C-Band Radarsensor.

Fig. 5: Classification of the land cover's influence for an C-band radar sensor.

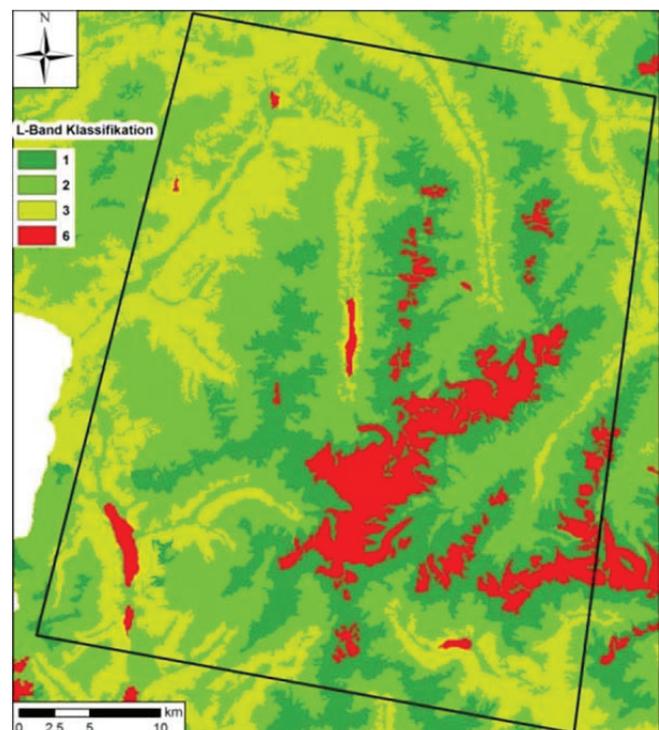


Abb. 6: Klassifikation des Einflusses der Landbedeckung für einen L-Band Radarsensor.

Fig. 6: Classification of the land cover's influence for an L-band radar sensor.

Der große Vorteil eines L-Band Sensors ist die Möglichkeit auch Regionen mit dichter Vegetation zu überwachen. Somit können auch die stark bewaldeten Regionen der unteren Talflanken mittels Radarinterferometrie überwacht werden (s. Abb. 6). Nur die Wasserflächen (komplette Dekorrelation innerhalb von Mikrosekunden (BAMLER & HARTL 1998) und vergletscherte Regionen (vgl. oben) können nicht überwacht werden. Nachteil eines L-Band Radarsensors ist aber seine deutlich niedrigere räumliche Auflösung im Vergleich zu den moderneren Radarsensoren, die im X-Band arbeiten (z.B. TerraSAR-X und COSMO-SkyMed).

5 PS Abschätzung vor Radaraufnahme

Der Vorteil der weiter entwickelten Methode Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) gegenüber dem konventionellen D-InSAR Verfahren ist neben der höheren Messgenauigkeit, dass nicht mehr flächendeckend hohe Kohärenzwerte benötigt werden. Es genügen punktuell hohe Kohärenzwerte – die sogenannten Persistent Scatterer (PS). Aber, ob genügend dieser PS in einem bestimmten Untersuchungsgebiet zur erfolgreichen Anwendung des PSI Verfahrens vorhanden sind, kann erst nach der Aufnahme und Prozessierung mehrerer Radaraufnahmen überprüft werden (COLESANTI & WASOWSKI 2006). Zudem wird beim PSI eine hohe Menge an Radardaten (mindestens 15 bis 50 Aufnahmen) benötigt (FERRETTI et al. 2000a, COLESANTI et al. 2003, HANSEN 2005 und CROSETTO et al. 2010). Dadurch wird die Prozessierung der Daten sehr zeitaufwändig und das Verfahren somit sehr teuer.

Um vor der Aufnahme bzw. Bestellung der teuren Radaraufnahmen überprüfen zu können, wie die PS Dichte in einem bestimmten Gebiet beschaffen sein wird, wurden in PLANK et al. (2012b) neue Methoden zur PS Abschätzung vor einer Radaraufnahme entwickelt.

Die in diesem Artikel angewandte PS Abschätzungsmethode basiert auf freiverfügbaren Landbedeckungsdaten. Es wurden dabei die bereits in Abschnitt 4 vorgestellten CORINE 2006 Landbedeckungsdaten verwendet. Die PS Abschätzungsmethode basiert auf dem statistischen Vergleich der Ergebnisse echter PSI Prozessierungen mit den Landbedeckungsdaten. Durch die Kalibrierung mit PSI Prozessierungsergebnissen von verschiedensten Testgebieten unterschiedlicher Klimazonen und Landbedeckungen, die mit verschiedenen Radarsensoren aufgenommen und mit verschiedensten PSI Algorithmen bearbeitet wurden, wurde für jede Landbedeckungskategorie im Datensatz CORINE 2006 eine Abschätzung der zu erwartenden PS Dichte ermittelt.

Um eine allgemeingültige PS Dichte Abschätzung zu ermöglichen, die für jeden Radarsensor und PSI Prozessierungsalgorithmus angewendet werden kann, wurde in PLANK et al. (2012b) die sogenannte relative PS Dichte ermittelt. Die PS Dichte wird dabei relativ zu der PS Dichte der Referenzklasse ‚Stadtgebiet‘ angegeben.

Folglich benötigt man für die Abschätzung der absoluten PS Dichte in einem neuen Gebiet eine Abschätzung / Information über die absolute PS Dichte in der Referenzklasse ‚Stadtgebiet‘ für den geplanten Radarsensor und den geplanten PSI Prozessierungsalgorithmus. Für das in diesem

Artikel behandelte Untersuchungsgebiet in den Ötztaler Alpen wird die PS Dichte für TerraSAR-X Daten im sogenannten StripMap Mode abgeschätzt (vgl. auch Abschnitt 2). Zur Abschätzung der absoluten PS Dichte in der Referenzklasse ‚Stadtgebiet‘ wurde der entsprechende Wert aus dem Untersuchungsgebiet Aschau am Inn herangezogen (vgl. PLANK et al. 2012b). In diesem Gebiet wurden ebenfalls Terra-SAR-X StripMap Mode Daten verwendet. Zudem wurde bei der PSI Prozessierung des Gebiets Aschau am Inn ein gängiger Algorithmus verwendet (Kombination aus dem sogenannten Signal-to-Clutter-Ratio und dem Amplituden Dispersion Index; zur genaueren Erläuterung dieser PS Detektionsalgorithmen siehe FERRETTI et al. 2001 und KAMPES 2006).

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der PS Dichte Abschätzung. Ein Vergleich der Abbildungen 3 und 7 zeigt die sehr hohe PS Dichte in den Siedlungsflächen. Auch die Bereiche, die mit nur spärlicher Vegetation bedeckt sind, zeichnen sich durch relativ hohe PS Dichten aus. Hier kann die PSI Methode sehr gut zur Überwachung von Hangbewegungen eingesetzt werden.

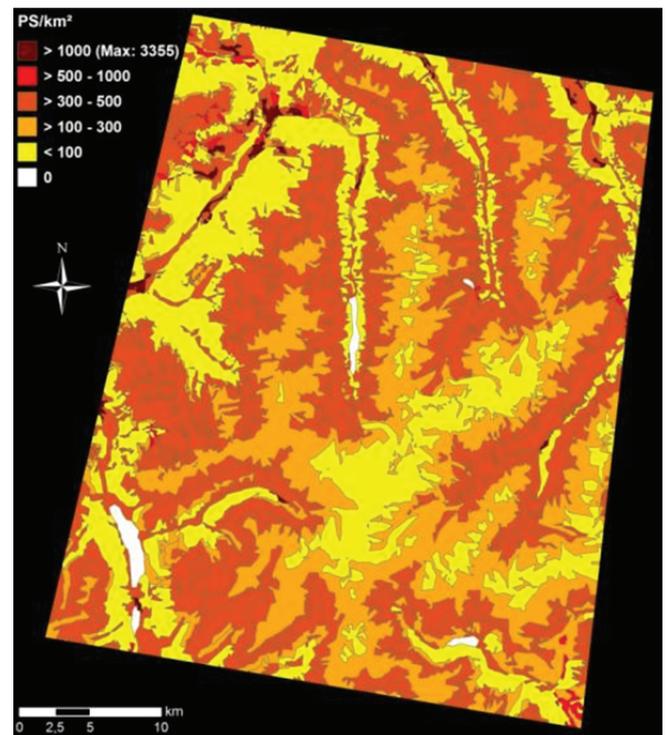


Abb. 7: Abschätzte PS Dichte für TerraSAR-X StripMap Mode.

Fig. 7: Estimated PS density for TerraSAR-X StripMap mode.

Die Felsregionen zeigen eine niedrigere PS Dichte, da sie aufgrund ihrer höheren Lage längere Zeit von Schnee und Eis bedeckt sind (und folglich niedrigere Kohärenzwerte aufweisen) und durch das stärkere topographische Relief der Einfluss von Layover und Shadow ansteigt. Eine Anwendung von PSI hängt damit auch sehr stark von der Aufnahmegeometrie und der Orientierung der Hangbewegung (Hangneigung und Hangeinfallrichtung) ab (vgl. Abschnitt 2 und Abbildungen 2 & 3).

Neben den vergletscherten Regionen in den Gipfellagen, zeichnen sich auch die dichtbewaldeten tiefer gelegenen



Talflanken durch ihre niedrigere PS Dichte aus. In diesen Regionen muss mit einer deutlich niedrigeren Anzahl an Messpunkten (PS) gerechnet werden. Hangbewegungen in den Waldregionen können nur bedingt mittels PSI überwacht werden.

Mit einer PS Dichte von 0 sind in Abbildung 7 auch deutlich die Wasserflächen im Untersuchungsgebiet zu erkennen (vgl. auch Abb. 3).

Die tatsächliche absolute PS Dichte hängt sehr stark von dem jeweiligen PSI Prozessierungsalgorithmus und den verwendeten Parametern ab. Die relative Beziehung der einzelnen Landbedeckungsklassen untereinander bezüglich ihrer PS Dichte bleibt aber bestehen (PLANK et al. 2012b).

6 Zusammenfassung

Differentielle Radarinterferometrie Methoden wie D-InSAR und PSI ermöglichen ein Monitoring von Hangbewegungen mit einer Genauigkeit bis in den Millimeterbereich. Um objektiv die limitierenden Faktoren dieser Methoden vor der Bestellung der teuren Radaraufnahmen abschätzen zu können und vorab die zur Untersuchung eines bestimmten Gebiets am besten geeigneten Aufnahmeparameter bestimmen zu können, wurden in diesem Artikel Verfahren zur Anwendbarkeitsprüfung von D-InSAR und PSI anhand eines Fallbeispiels in den Ötztaler Alpen präsentiert.

Literatur

- AHMED, R., SIQUEIRA, P., HENSLEY, S., CHAPMAN, B. & BERGEN, K. (2011): A survey of temporal decorrelation from spaceborne L-Band repeat-pass InSAR. – *Remote Sensing of Environment*, **115**: 2887-2896.
- BAMLER, R. & HARTL, P. (1998): Synthetic aperture radar interferometry. – *Inverse Problems*, **14**: 1-54.
- BARBIERI, M. & LICHTENEGGER, J. (2005): Introduction to SAR for geology. In FLETCHER, K. (Hrsg.): *Spaceborne Radar Applications in Geology*, ESA TM-17, 1-54, Noordwijk (ESA Publications Division, European Space Agency).
- CARTUS, O., SANTORO, M., SCHMULLIUS, C. & LI, Z. (2011): Large area forest stem volume mapping in the boreal zone using synergy of ERS-1/2 tandem coherence and MODIS vegetation continuous fields. – *Remote Sensing of Environment*, **115**: 931-943.
- CATANI, F., FARINA, P., MORETTI, S., NICO, G. & STROZZI, T. (2005): On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. – *Geomorphology*, **66**: 119-131.
- COLESANTI, C., FERRETTI, A., NOVALI, F., PRATI, C. & ROCCA, F. (2003): SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**: 1685-1701.
- COLESANTI, C. & WASOWSKI, J. (2006): Investigation landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. – *Engineering Geology*, **88**: 173-199.
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., IGLESIAS, R. & CRIPPA, B. (2010): Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C- and X-band Comparison. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **76**: 1061-1069.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA F. (2000a): Analysis of Permanent Scatterers in SAR Interferometry. – *IEEE Proc. IGARSS 2000*, Honolulu, 24-28 Juli, 761-763.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA F. (2000b): Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**: 2202-2212.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**: 8-20.
- FRUANEAU, B., ACHACHE, J. & DELACOURT, C. (1996): Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. – *Tectonophysics*, **265**: 181-190.
- HANSEN, R.F. (2005): Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. – *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **6**: 253-260.
- KAMPES, B.M. (2006): *Radar interferometry – Persistent Scatterer Technique*. – 211 S. Dordrecht (Springer).
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. (2007): *Remote Sensing and Image Interpretation*. – 804 S. New York (John Wiley & Sons).
- LU, Z. (2007): InSAR imaging of volcanic deformation over cloud-prone areas – Aleutian Islands. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **73**: 245-257.
- PLANK, S., SINGER, J., MINET, C. & THURO, K. (2012a): Pre-survey suitability evaluation of the differential synthetic aperture radar interferometry method for landslide monitoring. – *International Journal of Remote Sensing*, **33**: 6623-6637.
- PLANK, S., SINGER, J. & THURO, K. (2012b): Persistent scatterer estimation using optical remote sensing data, land cover data and topographical maps. – *IEEE Proc. IGARSS 2012*, 22-27 Juli, München, 3855- 3858.
- SQUARZONI, C., DELACOURT, C. & ALLEMAND, P. (2003): Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. – *Engineering Geology*, **68**: 53-66.
- WEGMÜLLER, U. & WERNER, C.L. (1995): SAR interferometric signatures of forest. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **33**: 1153-1161.