

Geomonitoring mittels SAR-Interferometrie

Die Überwachung natürlicher sowie durch den Menschen verursachten Veränderung mittels Geomonitoring gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Folgen durch den drastischen Eingriff des Menschen in die Natur im Rahmen der industriellen Rohstoffgewinnung und der darauf folgenden Renaturierung bedürfen einer besonders dichten Beobachtung.

Die Überwachung der durch den Berg- und Tagebau verursachten Bodenbewegungen ist seit Beginn des industriellen Abbaus eine große Herausforderung. Lange Zeit konnten die Bodenbewegungen nur durch aufwendige, terrestrische Vermessungen bestimmt werden. Im Laufe der Zeit kamen neue Methoden mittels fernerkundlicher Überwachung hinzu.

Als wohl neueste Methode zur großräumigen Überwachung von Erdbewegungen hat die SAR-Interferometrie den Sprung von der wissenschaftlichen Forschung hin zur Praxistauglichkeit geschafft. Ermöglicht wurde dies zum einen durch den Fortschritt der Satellitentechnik, den umfangreichen Datenarchiven und den sich immer weiter entwickelnden Auswertemethoden. Das Verfahren basiert auf der Auswertung von Radarsatellitenaufnahmen und erlaubt die Ausweisung von Erdoberflächen-, oder Objektbewegungen mit einer Genauigkeit von bis zu wenigen Millimetern pro Jahr.

Radarsatelliten

Erste satellitengestützte Radaraufnahmen lieferte der Satellit ERS-1 im Jahr 1991. Bis zum Jahr 2001 machte dieser, zusammen mit dem baugleichen ERS-2, für die SAR-Interferometrie nutzbare Aufnahmen der Erdoberfläche. Seit dem Jahr 2003 führt Envisat die kontinuierliche Aufnahme fort. Dies ermöglicht heute eine weltweite, fast zwanzigjährige, rückblickende Betrachtung von Erdoberflächenbewegungen.

Seit dem Jahr 2007 sind die Satelliten der neuesten Generation, wie TerraSAR-X, Radarsat-2 und COSMOSkymed im Einsatz. Diese, zumeist kommerziellen Systeme, bieten nicht nur eine höhere Flexibilität durch die größere Anzahl der verfügbaren Sensoren, sondern bieten darüber hinaus auch deutliche Fortschritte im Bereich der Datenqualität. So betragen die Aufnahmeintervalle, statt der 35 Tage bei Envisat und ERS, nur noch wenige Tage. Neben TerraSAR-X, welcher alle 11 Tage eine Auswertung ermöglicht, kann mit Hilfe der 4-Satellitenkonstellation CosmoSkymed im Abstand von ein bis acht Tagen eine Aufnahme des Projektgebiets erfolgen. So kann bei Schadensereignissen innerhalb kürzester Zeit eine Analyse der Oberflächenbewegungen erfolgen.

Darüber hinaus bieten die Satelliten eine deutlich verbesserte räumliche Auflösung von bis zu einem Meter. Im Vergleich zu der Auflösung von 25m der ersten Satelliten ermöglicht diese Verbesserung die Erfassung selbst kleinster Bewegungszonen, oder Rutschungsbereiche.

RADAR-Fernerkundung

Das Auswertungsverfahren der SAR-Interferometrie beruht auf der Analyse von RADAR-Satellitenaufnahmen. RADAR ist ein aktives Aufnahmesystem, welches im Gegensatz zu passiven Systemen, die zu messende Strahlung selbst erzeugt. Das Verfahren ist somit von der Sonne unabhängig. Weiterhin kann die langwellige Radarstrahlung Wolken fast ungehindert passieren. Diese Eigenschaften ermöglichen es, im Gegensatz zu Luftbildern oder optischen Satellitenaufnahmen, tageszeit- und wetterunabhängig Aufnahmen eines Gebiets zu erstellen. Das System liefert daher mit hoher Zuverlässigkeit Informationen des Untersuchungsgebiets.

Interferometrie

Beim Empfang des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals erfolgt parallel zur Aufzeichnung der Stärke des Radarechos auch die Aufzeichnung der Phase der elektromagnetischen Strahlung. Die Phase stellt den Schwingungszustand des elektromagnetischen Feldes dar. Dieser Schwingungszustand ist unter anderem von der Entfernung des Satelliten zur Erdoberfläche abhängig, also der Weglänge vom Erdboden bis zur Antenne des Satelliten. Da die Messung jedoch nicht die absolute Entfernung angibt, sondern indirekt die relative Weglängenänderung zeigt, ist eine umfangreiche Datenauswertung zur Ausweisung von Erdbewegungen notwendig.

So muss die Information der Bodenbewegung im Laufe der Auswertung von anderen Störeinflüssen isoliert werden. Letztere ist neben der Topografie und Umlaufbahnungenauigkeiten vor allem der Einfluss der Atmosphäre, welche von dem Radarsignal zweimal durchlaufen werden muss. Die erfolgreiche Beseitigung dieser Einflüsse ist essentiell zur hochgenauen Ausweisung der Oberflächenbewegungen.

Auswerteverfahren

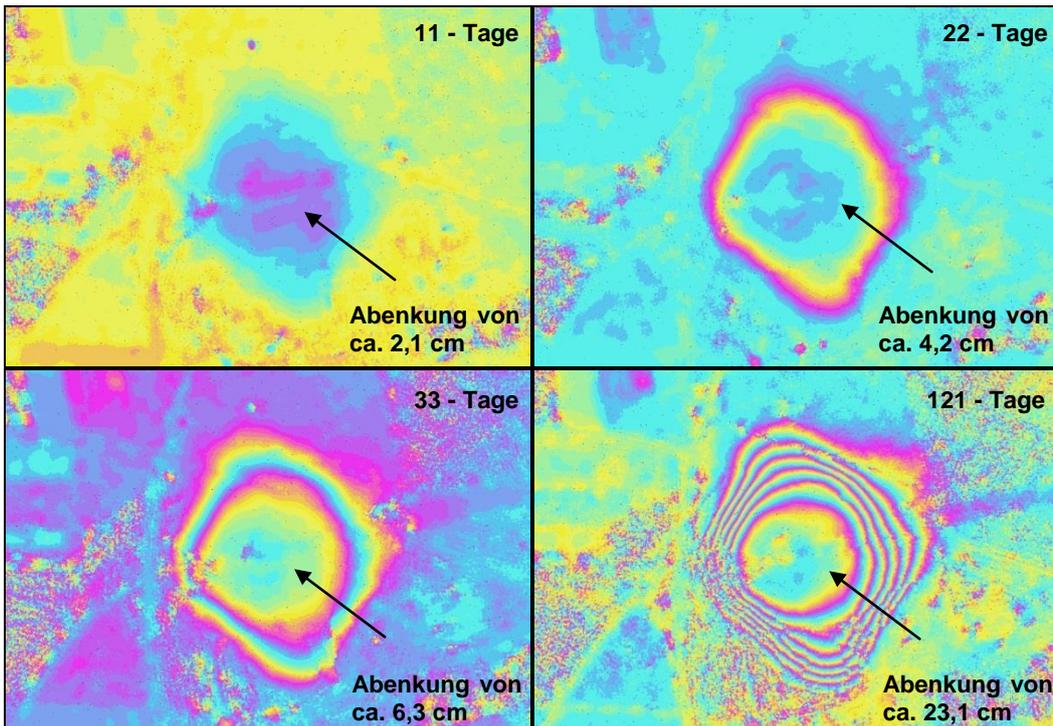
Die Verfahren zur Analyse und Interpretation der Daten entwickeln sich stetig weiter. Grundsätzlich zu unterscheiden ist die vollflächige Analyse mittels differentieller Interferometrie (DInSAR) von dem punktbasierten Verfahren (Persistent Scatterer – PSInSAR).

Differenzielle Interferometrie (DInSAR)

Bei der Auswertung mittels differentieller Interferometrie werden im Gegensatz zum PSInSAR-Verfahren zwei SAR-Satellitenaufnahmen pixelweise vollflächig ausgewertet. Dabei wird durch den Vergleich der Phasenwerte jedes Bildelements die Weglängenänderung zwischen Satellit und dem entsprechenden Bildelement bestimmt und in Bodenbewegungen umgerechnet.

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der Auswertung über verschiedene Zeitintervalle basierend auf der gleichen Ausgangsaufnahme. Zu sehen ist eine Senkungsmulde über einem Bergbaustollen. Das Interferogramm zeigt farbkodiert die Phasendifferenzen zwischen den beiden Satellitenaufnahmen. Der Farbverlauf von Cyan nach Magenta über Gelb bis zur Wiederkehr von Cyan entspricht der halben Wellenlänge des Satellitensystems.

Im vorliegenden Fall entspricht dies einer Absenkung von ca. 2,1 cm. Die Farbwahl für jedes Interferogramm ist zufällig und unabhängig von der eines anderen Interferogramms des gleichen Gebiets. Bestimmt wird die Bodenbewegung ausgehend vom nicht beeinflussten Umland. Alle von diesem Phasenwert abweichenden Phasenwerte werden als Weglängenänderung der Strecke Erde-Satellit gewertet und entsprechend der Wellenlänge des Satelliten in Bodenbewegung umgerechnet.



SBAS (Small Baseline interferometry)

Das SBAS-Verfahren basiert auf dem Prinzip DInSAR-Analyse. Zur Präzisierung der Ergebnisse werden jedoch Interferogramme zwischen allen in der Zeitreihe vorliegenden Aufnahmen erstellt. Da somit für einen Zeitabschnitt viele sich überlappende Bewegungsberechnungen (zwischen allen Kombinationsmöglichkeiten) vorliegen, werden Störkomponenten besser beseitigt und die Genauigkeit deutlich erhöht.

Abbildung 2 zeigt die Verknüpfung der einzelnen Aufnahmezeitpunkte einer Zeitreihe über einen Zeitraum von ca. einem Jahr. Klar zu erkennen ist, dass jede Aufnahme mit einer Vielzahl von anderen Aufnahmen verbunden ist, wodurch für einen beliebigen Zeitabschnitt mehrere Deformationsberechnungen vorliegen.

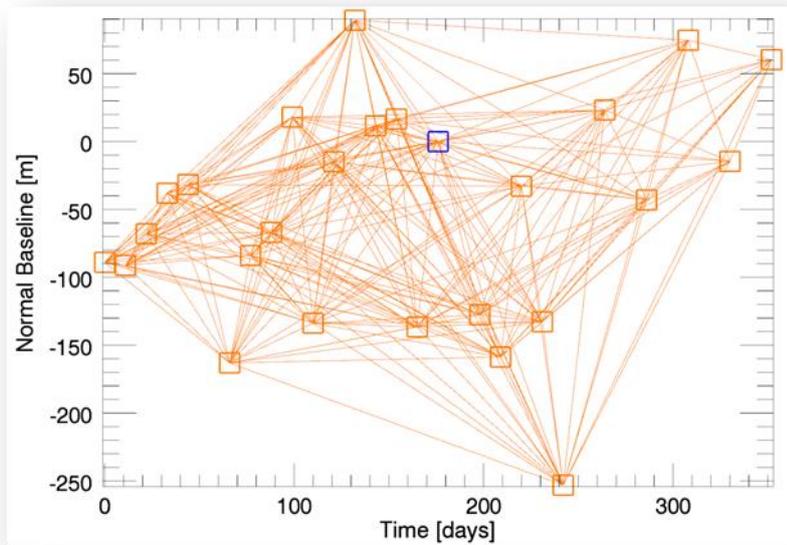


Abbildung 1: Verknüpfung von SAR-Aufnahmen einer Zeitreihe der SBAS Analyse

Das Endergebnis ist eine georeferenzierte Rasterdatei in welcher für jedes Bildelement die Bodenbewegung ausgegeben wird (Abb. 3). Die Informationsdichte entspricht der räumlichen Auflösung der verwendeten Satellitendaten (z.B. 3m, 10m, 25m).

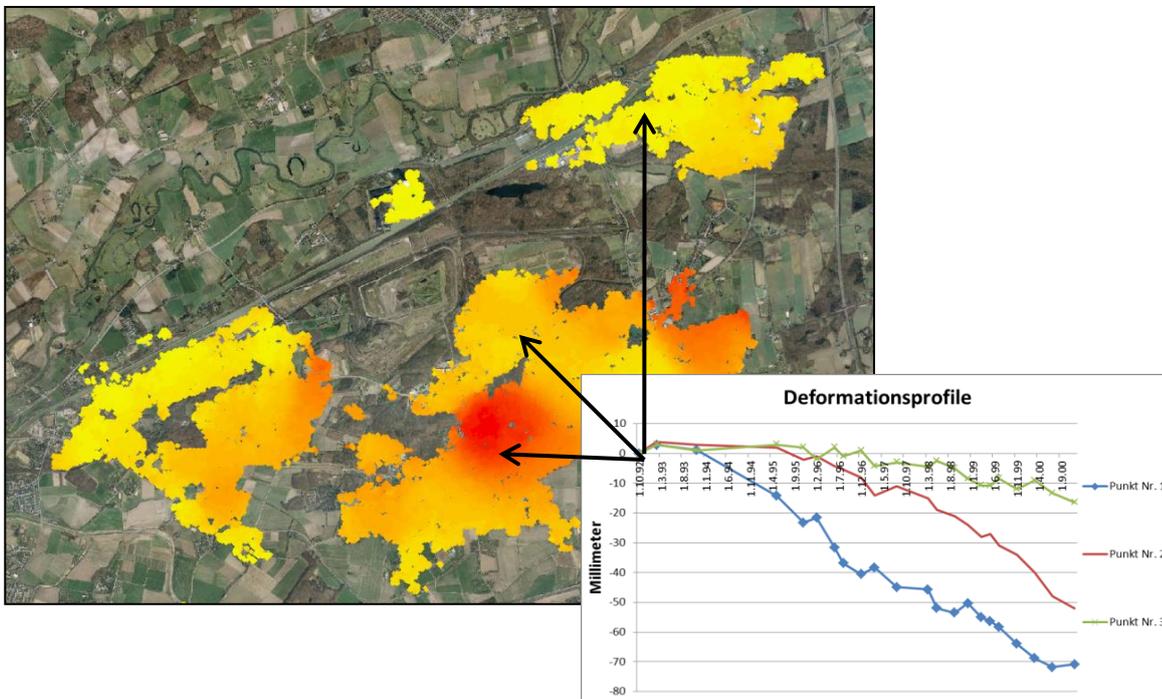


Abbildung 2: Ergebnis einer SBAS-Auswertung

Die Persistent Scatterer Analyse (PSInSAR)

Unter Persistent Scatterer werden Punktstrahler mit einem besonders starken und zeitlich konstanten Rückstreusignal bezeichnet. Diese Punktstrahler befinden sich meist an künstlichen Objekten wie Gebäuden, Gleisanlagen, Brücken usw., können jedoch auch natürlicher Herkunft sein und z.B. an größeren Felsen entstehen. Diese Punktstrahler besitzen eine spezielle Orientierung zum Satelliten, wodurch sie einen Großteil der einfallenden Radarstrahlung zum Sensor zurückstreuen. Der Punktstrahler kann eine Größe von wenigen Dezimetern haben, stellt jedoch für das Bildelement das dominante Rückstreusignal dar. Phasenvarianzen lassen sich somit auf Bewegungen dieses einzelnen Punktes zurückführen. Die Punktstrahler weisen zudem auch über Jahre hinweg eine hohe Kohärenz auf, so dass diese Punkte innerhalb einer Zeitreihe in jeder Aufnahme identifiziert und mit jeder anderen Aufnahme verglichen werden können.

Im Zuge der Auswertung erfolgt eine Atmosphärenkorrektur jeder Aufnahme, so dass die Genauigkeit der Bewegungsanalyse im Vergleich zur DinSAR-Auswertung deutlich gesteigert werden kann. Für eine optimale Eliminierung dieser Störeffekte ist ein Datensatz mit einem Umfang von ca. 25 Aufnahmen nötig. So können Genauigkeiten von ca. +/- 1 mm/Jahr bei optimaler zeitlicher Abdeckung mit Radaraufnahmen erreicht werden. Zu beachten ist, dass die Bewegungsmessung in der Schrägsicht des Sensors erfolgt.



Abbildung 3: Beispiel einer PSInSAR-Auswertung (Leipzig)

Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer PSInSAR-Analyse für den Stadtbereich von Leipzig. Für jeden der farbig markierten Punkte kann das Bewegungsprofil für einen Zeitraum von 6 Jahren ausgelesen werden (Abb. 5).

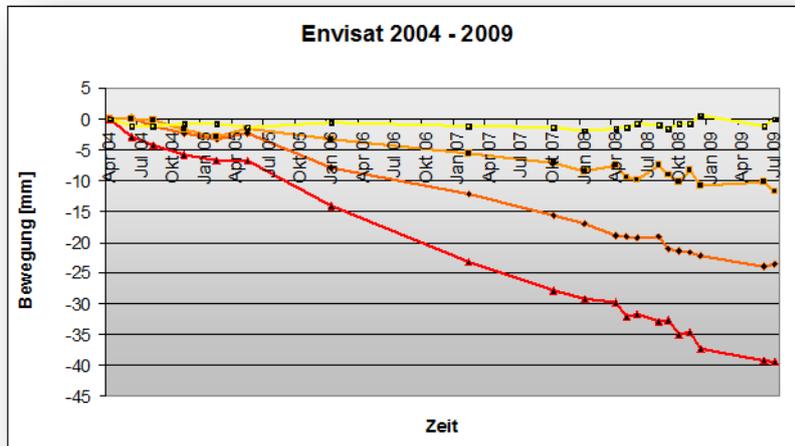


Abbildung 4: Bewegungsverlauf verschiedener Punkte im Innenstadtbereich Leipzig

Ausblick

Die SAR-Interferometrie kann eine terrestrische Vermessung jedoch nicht vollständig ersetzen, sondern stellt eine wichtige Komponente des Geomonitorings dar. Aufgrund der flächigen Erfassung und der hohen räumlichen Dichte der Bewegungsmessungen ermöglicht die Auswertung Aussagen zur räumlichen Verteilung und Verhalten von Bodenbewegungen, wie Sie mit punktuellen, terrestrischen Methoden nur schwer und unter hohen Kosten zu erreichen sind. Zwar können auch kleinräumige Hangrutschungen erfasst werden, doch liegt die Stärke des Verfahrens gerade in der synoptischen, großräumigen Erfassung tausender Quadratkilometer mittels jeder Satellitenaufnahme.

In den kommenden Jahren werden weitere Radar-Satelliten zur Verfügung stehen. Neben den kommerziellen Satelliten wie TerraSAR-X und Radarsat-2, werden die ESA-Satelliten der Sentinel-Reihe eine Fortsetzung der bisherigen Zeitreihen, sowie eine deutliche räumliche, als auch zeitliche Informationsverdichtung ermöglichen.