

Flächenhaftes Monitoring durch kombinierte Nutzung multisensoraler Radardaten

DIPL.-GEOL. MICHAEL SCHÄFER, DIPL.-INF. WILHELM HANNEMANN UND
PROF. DR.-ING. WOLFGANG BUSCH

Aufgrund von Einschränkungen der differentiellen Radarinterferometrie in ländlichen Regionen ist es nicht möglich, lückenlos flächendeckende Aussagen über Bodenbewegungen zu machen. Um sowohl im Raum als auch in der Zeit so viele Informationen wie möglich über Höhenänderungen zu gewinnen, werden Daten von drei verschiedenen SAR-Missionen (TerraSAR-X, ENVISAT ASAR und ALOS PALSAR) verwendet. Diese werden mit Hilfe von zwei verschiedenen Auswertansätzen (punktbasierte Persistent Scatterer Interferometrie und rasterbasierte Differentielle SAR-Interferometrie) analysiert.

Basierend auf den unterschiedlichen Eigenschaften der Satelliten und Sensoren wie Bodenauflösung, Wiederholintervall und Radarwellenlänge werden die jeweiligen Vorteile genutzt, um mehr Informationen zu gewinnen. Eine Kombination der Einzelergebnisse ermöglicht zudem Plausibilitätskontrollen.

Das Ziel ist die Erzeugung von möglichst flächendeckenden Informationen über Bodenbewegungen in einem vorwiegend ländlichen Bereich. Zum Vergleich stehen Referenzdaten (vor allem GPS- und Nivellementmessungen) zur Verfügung.

1. Einleitung

In vielen Bereichen der Rohstoffgewinnung kommt es zu bergbaubedingten Höhenänderungen der Tagesoberfläche. Beispielsweise muss zur Gewinnung von Braunkohle in der Regel der Grundwasserspiegel abgesenkt werden. Nach Einstellung der Wasserhaltungsmaßnahmen, zum Beispiel im Zuge der Renaturierung aufgelassener Tagebaue, kommt es zu einem Wiederanstieg des Grundwassers, wodurch sich die Tagesoberfläche wieder hebt (SCHADE 2004). Die so hervorgerufenen Verformungen können zu einer Gefährdung von Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen führen. Dies erfordert eine quasi-kontinuierliche Kontrolle, um die Auswirkungen des Bergbaus auf die Tagesoberfläche zeitnah zu erfassen.

Vorgestellt werden Ergebnisse des im Zeitraum Dezember 2008 bis Oktober 2011 durchgeführten Forschungsvorhabens „Flächendeckendes Monitoring bergbaubedingter Höhenänderungen durch kombinierte Nutzung multisensoraler Radardaten und interferometrischer Auswertverfahren (MultiSAR)“. Verwendet wurden Daten der Radarsatelliten ENVISAT, ALOS und TerraSAR-X, welche unter anderem verschiedene Auflösungen und Wellenlängen aufweisen (Abbildung 1). Diese Daten wurden mit den beiden unterschiedlichen Auswertemethoden

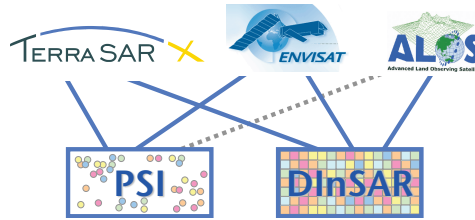


Abbildung 1: Auswertestrategie des Forschungsvorhabens MultiSAR

DInSAR (Differentielle Radarinterferometrie) und PSI (Persistent Scatterer Interferometrie) kombiniert, um deren jeweilige Vorteile für eine möglichst flächendeckende Aussage von Bodenbewegungen zu nutzen. Dies erfolgt mittels eines GIS-basierten Auswertetools (vgl. HANNEMANN, BROCK & BUSCH 2011), welches sowohl eine Analyse der Bodenbewegungen, als auch einen Vergleich mit geodätisch ermittelten Höhenänderungen ermöglicht.

Übergeordnetes Ziel des Vorhabens war die Weiterentwicklung der Radarinterferometrie zu einem anwendungsreifen Messverfahren im Kontext zu den bewährten geodätischen Verfahren.

2. Untersuchungsgebiet

Die entwickelten Konzepte und Methoden werden im Braunkohlerevier südlich von Leipzig erprobt, wo in enger räumlicher Nachbarschaft sowohl Absenkungen der Tagesoberfläche durch Sumpfung im Umfeld aktiver Braunkohletagebaue, als auch Hebungen durch den Grundwasserwiederanstieg im Zuge der Flutung von Tagebaurestlöchern auftreten (s. Abb. 2).

Die beiden sich im aktiven Abbau befindlichen Tagebaue der Mitteldeutschen Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG) sind der Tagebau „Profen“ westlich des Flusses Weiße Elster und der Tagebau „Vereinigtes Schleenhain“ östlich dieses Flusses. In diesem Bereich treten geringe Senkungen der Geländeoberfläche von bis zu einem Zentimeter pro Jahr auf. In direkter Nachbarschaft der aktiven Tagebaue befinden sich in einem über 400 km² großen Gebiet eine Vielzahl stillgelegter Tagebaue und aufgelassener Tagebaurestlöcher, welche von der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbauverwaltungs-gesellschaft mbH (LMBV) verwaltet, geotechnisch saniert und renaturiert werden. In diesen Bereichen finden sich stellenweise leichte Hebungen der Geländeoberfläche.

Die Zusammenarbeit mit Firmen im Leipziger Braunkohlerevier hat es erlaubt, auf umfangreiche Vermessungsdaten als Referenzdaten zurückgreifen, sowie darüber hinaus zusätzliche Messungen für das Vorhaben zu ermöglichen (s. nächstes Kapitel).



Abbildung 2: Untersuchungsgebiet (Quelle: www.lmbv.de, mit freundlicher Genehmigung)

3. Datengrundlage

Für Vergleichszwecke standen Referenzdaten zur Verfügung, vorwiegend in Form von Nivellementdaten. Das im Südraum Leipzig gemeinsam von LMBV mbH und MIBRAG mbH durchgeführte Reviernivellement wird zweijährig zu den ungeraden Jahren erstellt. Daneben werden zu den geraden Jahreszahlen für eine Anzahl kleinerer Ortschaften im Umfeld der aktiven Tagebaue Ortslagennivellements durchgeführt. Darüber hinaus standen Objektmessungen von Infrastruktureinrichtungen und Gebäuden zur Verfügung. Diese werden überwiegend innerhalb bzw. im Bereich der aktiven Tagebaue in der Regel alle drei bis sechs Monate durchgeführt.

Das für die Auswertungen benötigte digitale Höhenmodell (DHM) wurde aus dem vom DLR bereitgestellten DHM (SRTM-X) und einem höher aufgelösten, aus Luftbildbefliegungen erstellten, DHM der MIBRAG mbH mosaikiert. Durch die Verwendung dieses DHMs ist eine höhere Qualität der radarinterferometrischen Auswertungen möglich (vgl. WALTER 2011).

Für die radarinterferometrischen Auswertungen standen Zeitreihen von Radaraufnahmen verschiedener Satelliten zur Verfügung. Diese Satelliten sind der europäische Umweltbeobachtungssatellit ENVISAT (Environmental Satellite), der deutsche Radarsatellit TerraSAR-X sowie der japanische Erdbeobachtungssatellit ALOS (Advanced Land Observing Satellite). Alle

drei Satelliten tragen Radarsensoren mit einer synthetischen Apertur (SAR), allerdings unter Verwendung unterschiedlicher Radarwellenlängen und mit unterschiedlicher Bodenauflösung (s. Abbildung 3). Je nach Wellenlänge sind die Radardaten unterschiedlich gut für Bereiche verschiedener Landnutzungen geeignet. So durchdringen größere Wellenlängen besser Vegetation, ermöglichen jedoch auch nur eine geringere Genauigkeit für die Erfassung von Höhenänderungen als kürzere Wellenlängen.

Von dem Radarsensor ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) an Bord des Satelliten ENVISAT stand die längste Zeitreihe zur Verfügung. Der mit insgesamt 49 Szenen abgedeckte Zeitraum ist April 2005 bis Oktober 2010, bei einer minimalen Wiederholrate von 35 Tagen. Die Daten im C-Band des elektromagnetischen Spektrums (Wellenlänge 5,6 cm) weisen eine Bodenauflösung von ca. 4×20 m auf.

Von dem SAR Sensor an Bord von TerraSAR-X standen zwei getrennte Zeitreihen zur Verfügung, welche aus unterschiedlichen Aufnahmepositionen aufgenommen wurden. Die insgesamt 50 während des Descending Überfluges (Flugrichtung des Satelliten nach Süden, Blickrichtung nach Westen) aufgenommenen Szenen decken den Zeitraum Mai 2009 bis Mai 2011 ab. Die 37 Aufnahmen des Ascending Überfluges (Flugrichtung nach Norden, Blickrichtung nach Osten) beginnen im Dezember 2009 und enden ebenfalls im Mai 2011. Die TerraSAR-X Szenen wurden im X-Band aufgezeichnet (Wellenlänge 3,1 cm), die geometrische Bodenauflösung beträgt ca. 1×2 m.

Die von dem Radarsensor PALSAR (Phased Array L-Band Synthetic Aperture Radar) an Bord des Satelliten ALOS aufgenommene Zeitreihe deckt den Zeitraum Juli 2007 bis Juli 2010 mit lediglich 13 Szenen ab. Die bei einer Wellenlänge von 23,6 cm (im L-Band) aufgenommenen Szenen weisen eine Bodenauflösung von ca. 5×8 m auf. Das minimale interferometrisch nutzbare Aufnahmeintervall beträgt 46 Tage, durch den Ausfall von Aufnahmen steht jedoch nur durchschnittlich alle 106 Tage eine Szene zur Verfügung.

Die radarinterferometrischen Auswertungen wurden mit der „GAMMA SAR and Interferometry Software“ der Firma Gamma Remote Sensing and Consulting AG, Schweiz durchgeführt. Für die Persistent Scatterer Interferometrie wurde das Gamma Modul „Interferometric Point Target Analysis“ (IPTA) verwendet. Die Darstellung und Analyse der Ergebnisse erfolgte mit der Software ArcGIS sowie vom IGMC entwickelten Erweiterungen.

4. Differentielle Radarinterferometrie

4.1. Allgemeines

Das Prinzip der differentiellen Radarinterferometrie mit SAR Daten (DInSAR) beruht auf der Verrechnung zweier Satellitenszenen zu einem Interferogramm, welches die Phasendifferenz zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten darstellt. In diesem Interferogramm sind noch Phasenanteile enthalten, die durch die leicht verschiedenen Positionen des Satelliten zu den beiden Aufnahmezeitpunkten bedingt sind. Werden diese Phasenanteile unter Berücksichtigung der Orbitdaten und der Geländetopographie entfernt, ergibt sich ein differentielles

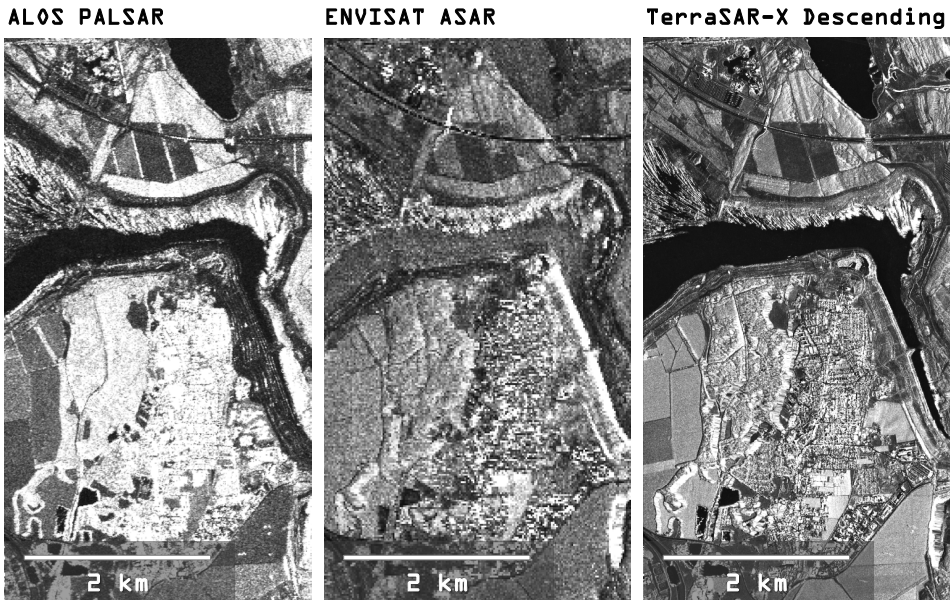


Abbildung 3: Intensitätsbilder von ALOS, ENVISAT und TerraSAR-X im Vergleich

Interferogramm. Darin enthalten ist der zu detektierende, durch Bodenbewegungen bedingte Phasenanteil und außerdem weitere unerwünschte Bestandteile, welche durch Atmosphäre und Dekorrelation bedingt sein können. Lokale Inhomogenitäten innerhalb der Erdatmosphäre können zu gewissen Zeitpunkten einen bedeutenden Einfluss auf die Ergebnisse der differentiellen Interferometrie besitzen und vor allem schwache Bodenbewegungssignale überlagern. Sie führen jedoch gegenüber Dekorrelation nicht zu einem flächenhaften Verlust an Information und werden daher im Folgenden nicht weiter behandelt (für weitere Informationen hierzu siehe SCHÄFER 2012).

Verschiedene Dekorrelationseffekte bewirken den Verlust einer räumlich eindeutigen Phasenbeziehung zwischen den Auflösungszellen der beiden Szenen. Diese können beispielsweise durch eine zeitliche Änderung der Rückstreuungseigenschaften bedingt sein (zeitliche Dekorrelation). Dies tritt vor allem in Gebieten mit Vegetationsbedeckung auf und ist somit lokal begrenzt. Auch eine stark abweichende Aufnahmegeometrie von einem Satellitenüberflug zum Nächsten, aufgrund unterschiedlicher Positionen des Satelliten (senkrechte Basislinie), äußert sich in einer Verminderung der Phasenbeziehung und führt zu einer geometrisch bedingten Dekorrelation. Dekorrelation resultiert in einer niedrigen Kohärenz zwischen den Phasenwer-

ten und äußert sich in differentiellen Interferogrammen durch ein räumliches Rauschen. Bei leichter Dekorrelation kann zumeist durch räumliche Filterung immer noch ein Ergebnis gewonnen werden, wenn auch mit einer verschlechterten Bodenauflösung. Bei vollständigem Kohärenzverlust ist ein Gebiet nicht mehr auswertbar und wird in der Regel ausmaskiert und nicht ausgewertet. Dennoch kann in gewissen Zeiträumen auch ein Gebiet mit hoher zeitlicher Dekorrelation auswertbar sein, beispielsweise lassen Ackerflächen oft ab späten Herbst bis zum Beginn der Vegetationsperiode im Frühling eine Aussage zu. Über längere Zeiträume hinweg (über ein Jahr) verbleiben jedoch meist nur Ortschaften auswertbar.

4.2. Verwendete Auswerteverfahren

Diesen Umstand macht sich das hier verwendete DInSAR Stapelungsverfahren zu Nutze. Dieses ist ähnlich dem „Cascade Stack“ bei (LEIJEN & HANSSEN 2004), benutzt jedoch im Gegensatz dazu sämtliche Zeitpunkte des Stapels und verbindet diese untereinander wie die Zweige eines Astes. Daher wird der so gebildete Stapel im Folgenden als „verzweigter Stapel“ bezeichnet (engl. Branched Stack, vgl. auch SCHÄFER 2012). Ausgehend von einem Referenzzeitpunkt werden zeitlich nachfolgende Interferogramme addiert und zeitlich zurückliegende Interferogramme subtrahiert. Nach und nach kann so für jeden Zeitpunkt eine Höhenänderung berechnet werden. Die Stapelbildung erfolgt unter Beachtung eines möglichst kleinen zeitlichen Abstands (geringe zeitliche Dekorrelation) und einer möglichst kleinen räumlichen Basislinie (geringe geometrische Dekorrelation). Dabei wird darauf geachtet, dass möglichst eine Hauptverbindungslinie (ein „Ast“) mit kohärenten Interferogrammen durch den gesamten Stapel verläuft (siehe Abbildung 4). Andere Interferogrammkombinationen, welche zu einem Verlust an kohärenter Fläche führen (z.B. Szenen mit großer Basislinie oder Zeitpunkte mit Schneebedeckung), werden nach Möglichkeit nur für Seitenlinien (die „Zweige“) verwendet, die nicht weiter als nötig verfolgt werden. So ist auch für Zeitpunkte mit einer großen Basislinie meist noch eine Aussage möglich, dieses Zwischenergebnis wird aber in der Regel nicht für die Berechnung weiterer Zeitpunkte verwendet, da es hier zu einem Verlust an auswertbarer Fläche führen würde. Die Berechnung der Höhenänderungen erfolgt nur für kohärente Flächen, welche bei jedem Interferogramm unterschiedlich sein können. Am Ende der Berechnung ist somit für jeden Zeitpunkt eine individuelle rasterbasierte Höhenänderungsinformation verfügbar. Je nach betrachtetem Pixel können an einer Lokation zu allen oder auch nur zu wenigen Zeitpunkten Informationen verfügbar sein.

Eine andere Auswertestrategie verfolgt die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI). Bei diesem punktbasierten Verfahren werden zunächst sogenannte Punktstreuer (Persistent Scatterer, PS) in einem Datenstapel ermittelt, welche eine langzeitstabile Phase besitzen. Dies sind meist anthropogene Objekte an der Erdoberfläche, wie Gebäude und Infrastruktureinrichtungen, an denen durch Mehrfachreflexionen die Radarwelle direkt zum Sensor zurück reflektiert wird. Gebiete mit Vegetationsbedeckung besitzen in der Regel keine langzeitstabilen Rückstreuungseigenschaften und sind somit für die PSI Auswertung ungeeignet. Nichtsdestotrotz kann sich ein Punktstreuer innerhalb einer dekorrelierten Fläche befinden, welcher mittels einer rasterbasierten DInSAR Auswertung nicht entdeckt werden könnte.

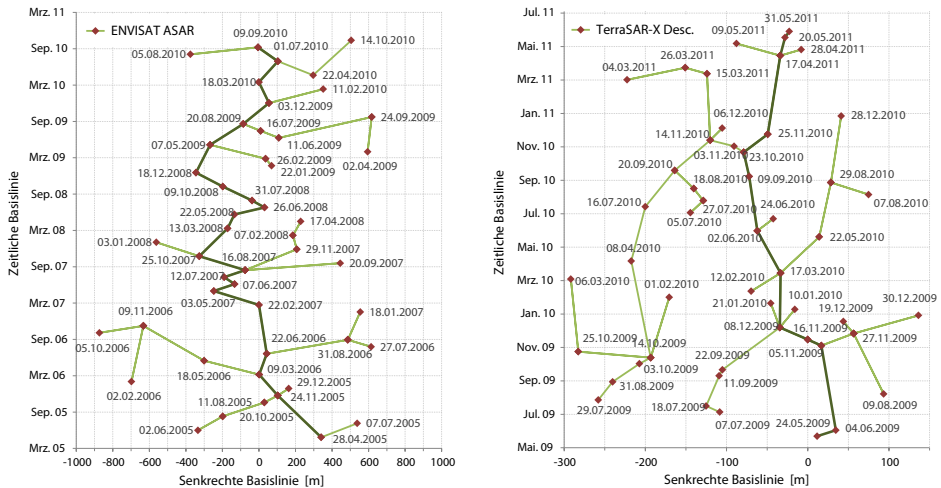


Abbildung 4: Verzweigte Interferogrammtapel am Beispiel von ENVISAT mit 49 Szenen (links) und TerraSAR-X Descending mit 50 Szenen (rechts)

Anschließend wird für jeden Zeitpunkt ein Interferogramm berechnet, jeweils bezogen auf einen gemeinsamen Referenzzeitpunkt. Diese Vorgehensweise ist für rasterbasierte Auswertungsverfahren nicht optimal, da Interferogramme mit einer großen Basislinie (sowohl geometrisch, als auch zeitlich) zu einem starken Kohärenzverlust durch Höhenfehler sowie durch geometrische und zeitliche Dekorrelation führen würden. Bei der punktbasierten PSI Auswertung können hingegen Höhenfehler für jeden Punkt geschätzt werden, was die geometrische Dekorrelation stark verringert. Zudem besitzen die Punktstreuer der PSI eine langzeitstabile Phase, weswegen nur eine geringe zeitliche Dekorrelation vorhanden ist. Aus diesen Gründen können bei der PSI-Methode auch Interferogrammkombinationen mit großen Basislinien verwendet werden.

Die eigentliche PSI-Auswertung basiert auf einer zweidimensionalen linearen Regressionsanalyse der differentiellen Phasenwerte in Abhängigkeit von der zeitlichen und der senkrechten Basislinie. Dies ermöglicht sowohl eine Schätzung von sich zeitlich linear verändernden Phasenanteilen (zeitliche Deformationsrate), als auch von basislinienabhängigen Höhenfehlern für jeden PS-Punkt. Dabei dient die Standardabweichung der residualen Phasenwerte als Kriterium für die Qualität eines Punktes, anhand derer Punkte von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden können. Für die Regressionsanalyse ist ein ausreichend großer Datensatz erforderlich (idealerweise mehr als 25 Aufnahmezeitpunkte); daher eignet sich die PSI für die Charakterisierung des Bewegungsverhaltens über längere Zeiträume hinweg.

4.3. Flächenhafte Aussagefähigkeit des DInSAR Stapels in Abhängigkeit von der Szenenanzahl

Es wurde untersucht, wie sich die Flächengröße, über die eine Aussage bezüglich Höhenänderungen getroffen werden kann, mit der Zeit ändert. Abbildung 5 zeigt, dass die prozentuale auswertbare Fläche ausgehend vom Referenzzeitpunkt (100%) mit zunehmender Zeitdifferenz abnimmt. Winterszenen führen in der Regel zu einer temporären Verringerung der auswertbaren Fläche (siehe beispielsweise Januar 2009 bei ALOS PALSAR oder Januar 2010 und 2011 bei TerraSAR-X Descending). Dank des verwendeten Stapelungsverfahrens mit einem verzweigten Stapel steigt die auswertbare Fläche in der Regel nach einem Winterzeitraum wieder deutlich an. Aufgrund der langen Wellenlänge von ALOS PALSAR lassen sich hiermit auch über einen Zeitraum von über zwei Jahren noch 25 bis 30% der Fläche auswerten. TerraSAR-X weist im Vergleich zu ENVISAT eine fast identisch große auswertbare Fläche auf. Diese beläuft sich auf ca. 20% der Gesamtfläche nach einer Zeitdifferenz von einem Jahr bezogen auf den Referenzzeitpunkt. Mit zunehmender Zeitdifferenz wird die auswertbare Fläche bei ENVISAT jedoch immer kleiner, so dass nach fünf Jahren lediglich noch ca. für 8% der Fläche eine zeitlich durchgehende Aussage möglich ist.

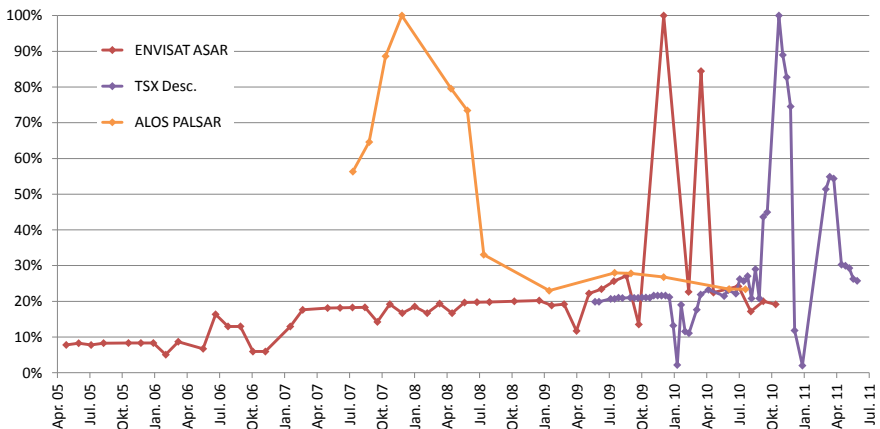


Abbildung 5: Prozentuale räumliche Abdeckung in Abhängigkeit von den verwendeten Radarszenen

5. Kombinierte Nutzung

Die verfügbaren SAR Daten wurden sowohl mit PSI, als auch mit dem verzweigten Stapelungsverfahren ausgewertet. Somit konnten die Vorteile beider Verfahren für die Auswertung kombiniert und die Ergebnisse an ausgewählten Stellen verglichen werden. Lediglich die ALOS-Daten konnten aufgrund ihrer geringen Anzahl von 13 Szenen nicht sinnvoll mittels

PSI ausgewertet werden. Die geringe Anzahl an Szenen bewirkt hier eine starke Streuung der Ergebnisse aufgrund von Unsicherheiten bei der linearen Regression. Zudem werden aus diesem Grund viele fälschlicherweise als stabil angenommene PS Punkte auf forst- und landwirtschaftlichen Flächen detektiert, bei denen sich zufälligerweise geringe residuale Phasenwerte ergeben haben. Bei einer größeren Anzahl an Szenen werden diese Punkte in der Regel zuverlässig anhand der Standardabweichung der residualen Phasenwerte aussortiert.

5.1. Verbesserung der räumlichen Abdeckung

Drei Faktoren tragen maßgeblich zu einer unterschiedlichen räumlichen Abdeckung des Projektgebiets bei: Zum einen haben die verschiedenen SAR-Sensoren unterschiedliche Radarwellenlängen und damit eine unterschiedliche Robustheit gegenüber Datenlücken in Vegetationsflächen. Vegetation wird kaum (TerraSAR-X) bis gut (ALOS PALSAR) durchdrungen. Zum anderen ergibt sich durch die gewählte Auswertemethode eine unterschiedliche Verteilung der Bereiche mit ermittelten Höhenänderungen. Das Persistent Scatterer Verfahren lieferte über die Fläche verteilte Einzelpunkte und ist gerade für anthropogene Objekte gut geeignet. Dem gegenüber liefert das rasterbasierte Stapelungs-Verfahren verwertbare Höhenänderungsinformationen für größere zusammenhängende Bereiche. Als dritter Aspekt ist die Anzahl der berücksichtigten Zeitpunkte anzuführen. Je mehr Zeitpunkte und damit Satellitenszenen in einer Auswertung verwendet werden, desto stabiler ist im Allgemeinen das Ergebnis. Einhergehend damit sinkt auch die Fläche, für die Daten vorliegen, da ein immer kleinerer Bereich einen für alle Zeitpunkte stabilen und konsistenten Wert aufweist.

Um den Flächenzugewinn einer kombinierten Nutzung darzustellen wurde der von allen Sensoren gemeinsam erfasste Bereich des Projektgebiets in Planquadrate a $2500m^2$ unterteilt. In diesem Bereich werden PSI-Auswertungen für TerraSAR-X und ENVISAT und ein möglichst viele Zeitpunkte umfassendes Stacking-Ergebnis für ALOS miteinander verglichen. Die Ascending- und Descending-Daten von TerraSAR-X wurden gemeinsam betrachtet. Rund 11% der Gesamtfläche ist von allen drei Sensoren abgedeckt. In 45% der Planquadrate konnten mit mindestens einem Sensor und einem Auswerteverfahren Höhenänderungswerte ermittelt werden. Für weiße Bereiche (55%) liegen keine Informationen vor. Abbildung 6 zeigt rechts die Planquadrate im Projektgebiet, eingefärbt nach Sensor. Auf der linken Seite ist die Verteilung dieser Flächen als Venn-Diagramm dargestellt. Es ist erkennbar, dass die von ENVISAT mit PSI auswertbaren Planquadrate (14%) komplett von TerraSAR-X (37%) abgedeckt werden. TerraSAR-X und ALOS ergänzen sich, wobei für 11% bzw. 8% der Fläche ausschließlich Informationen von einem der beiden Satelliten vorliegen.

Abbildung 7 zeigt einen Vergleich zwischen den DInSAR Auswertungen dreier Datenstapel von ALOS, ENVISAT und TerraSAR-X im Bereich des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain. Es zeigt sich, dass im Bereich von Tagebauen und Ortschaften in der Regel Aussagen über Zeiträume von über einem Jahr möglich sind. Die im Betrieb befindlichen Tagebauflächen, sowie landwirtschaftlich genutzte Flächen erlauben jedoch meist nur Aussagen über kürzere Zeiträume. Kleinere Bereiche sowie Wasserflächen lassen zu keiner Zeit Aussagen zu. Im unteren Bereich von Abbildung 7 sind zum Vergleich PS-Punkte dargestellt. Sie zeigen eine gute Übereinstimmung mit den DInSAR-Flächen welche eine langfristige Aussage erlauben. Darüberhinaus

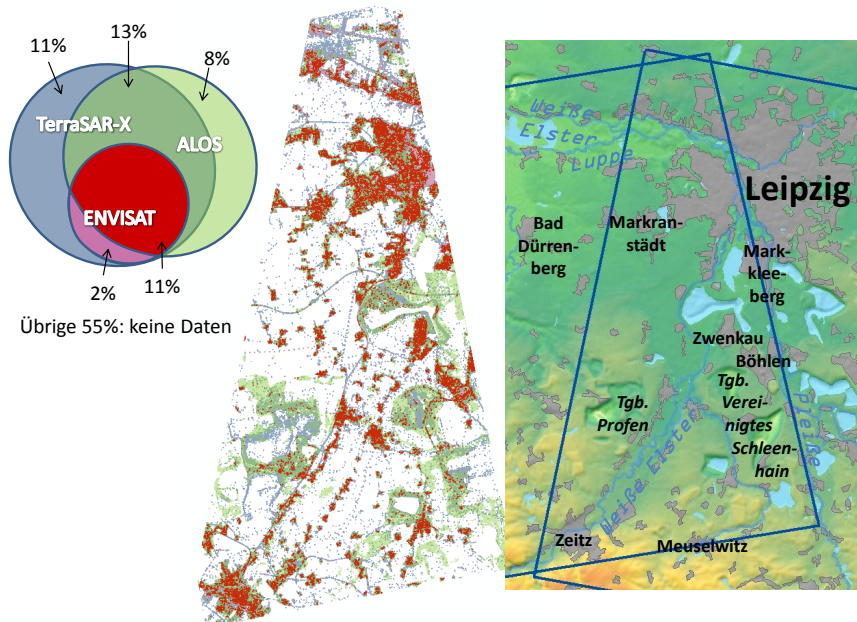


Abbildung 6: Räumliche Abdeckung: Ergänzung der verschiedenen Sensoren (links: Venn-Diagramm der abgedeckten Flächen, mitte: eingefärbte Planquadrate, Färbung wie im Venn-Diagramm rechts: Übersichtskarte)

zeigen sich, besonders in dem TerraSAR-X Ergebnis, lineare Strukturen wie Straßen, Eisenbahnlinien, Förderanlagen und Strommasten. Zu beachten ist, dass das PSI-Ergebnis von ALOS PALSAR aufgrund der geringen Szenenanzahl eine schlechte Vergleichbarkeit mit den anderen Ergebnissen aufweist.

Die ENVISAT Zeitreihe weist mit 49 Szenen nahezu identisch viele Zeitpunkte wie die TerraSAR-X Zeitreihe mit 50 Szenen auf. Dennoch weist das ENVISAT PSI-Ergebnis die geringste Anzahl an PS-Punkten auf. Dies liegt zum einen an der geringen Bodenauflösung der ASAR-Daten im Gegensatz zu TerraSAR-X, zum anderen an der langen zugrundeliegenden Zeitreihe (ENVISAT 5,5 Jahre im Gegensatz zu 2 Jahren bei TerraSAR-X). Hier zeigt sich, dass mit zunehmender Zeitspanne immer weniger Objekte der Erdoberfläche zeitlich stabile Phasenwerte besitzen.

5.2. Kombination der zeitlichen Abdeckung

Bedingt durch die unterschiedlichen Laufzeiten der einzelnen Satellitenmissionen und die unterschiedlichen Wiederholintervalle der Überflüge sind sowohl verschiedene Zeiträume als auch

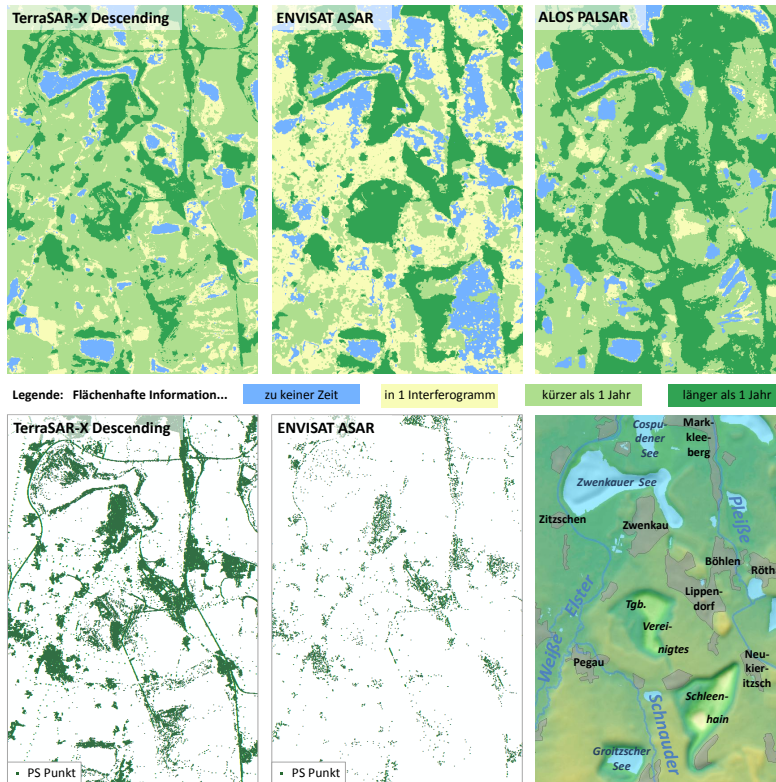


Abbildung 7: Vergleich zwischen den DInSAR- und PSI-Auswertungen von ALOS, ENVISAT und TerraSAR-X im Bereich des Tagebaus Vereinigtes Schleenhain

verschiedene Zeitintervalle durch die Sensoren erfasst. Eine Übersicht der vorhandenen Satellitenszenen verdeutlicht dies in Abbildung 8. Daten von ENVISAT sind für einen relativ langen Zeitraum vorhanden, ab Oktober 2010 ist dieser Sensor wegen einer Orbitänderung aus technischen Gründen nicht mehr für das Projekt nutzbar. Die TerraSAR-X Daten sind auch über diesen Zeitpunkt hinaus erhältlich, bei einem wesentlich kleineren Wiederholintervall von 11 Tagen pro Szene.

Die hieraus berechneten, zunächst getrennt zu betrachtenden Zeitreihen liefern keine absoluten Höhen, sondern jeweils Höhenänderungen bezogen auf einen in der Berechnung vorgegebenen Referenzzeitpunkt. Um eine gemeinsame Zeitreihe der Höhenänderungen zu erstellen, und somit die ENVISAT-Daten durch TerraSAR-X fortschreiben zu können, ist der Offset zwischen den Referenzzeitpunkten zu bestimmen. In der Regel sind keine gemeinsamen Zeit-

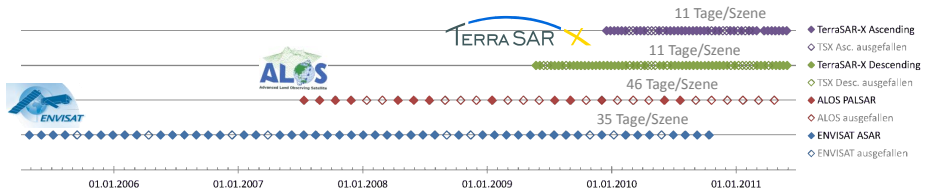


Abbildung 8: Zeitliche Abdeckung durch die verschiedenen Sensoren

punkte vorhanden, zusätzlich sind die gemessenen Werte mit einer Unsicherheit behaftet - eine genaue Bestimmung dieses Offsets ist in der Regel nicht möglich.

Um einen plausiblen Näherungswert zu erhalten und die Daten gemeinsam darstellen zu können wird der Offset durch eine Ausgleichung geschätzt. Die Zeitreihen lassen sich darstellen als Höhenänderungswerte $d(S, P, T)$, wobei S für den Sensor bzw. die Auswertung steht, P für den betrachteten räumlichen Punkt und T für den betrachteten Zeitpunkt. Um für einen vorgegebenen Punkt p_a einer Auswertung a den Offset zu bestimmen werden innerhalb eines maximalen Suchradius alle räumlich benachbarten Punkte p_b der Auswertung b betrachtet. Für jeden gemessenen Zeitpunkt t_a in a wird innerhalb einer Toleranz ein entsprechender Zeitpunkt t_b in b gesucht. Der Offset, welcher den Abstand der beiden Höhenänderungszeitreihen zueinander minimiert, ergibt sich aus dem Mittelwert der Differenzen $d(a, p_a, t_a) - d(b, p_b, t_b)$. Ein Beispiel für eine Offset-korrigierte TerraSAR-X Zeitreihe (grün) ist in Abbildung 9 zu sehen, die ursprüngliche TerraSAR-X Zeitreihe (magenta) wurden in die ENVISAT-Zeitreihe (blau) eingepasst.

5.3. Plausibilitätskontrollen

Die gemeinsame Betrachtung verschiedener Auswertungen ermöglicht einfache Plausibilitätskontrollen. Neben den visuellen Vergleichen einzelner Punkte ist die Berechnung der Stichprobenkovarianz $s_{xy} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ eine weitere Möglichkeit. Für den überlappenden Zeitbereich zweier benachbarter Zeitreihen sollten die Tendenzen der Höhenänderungen gleich sein, daher deuten negative Werte s_{xy} an einem Punkt p auf Unstimmigkeiten in einer der beiden Auswertungen hin. Die Punkte mit negativer Stichprobenkovarianz in Bezug auf die Nachbarpunkte können in einem GIS entsprechend eingefärbt werden und in einem manuellen Prozess bewertet werden, um ggf. Korrekturen vorzunehmen.

5.4. Datenfusion

Die vorhandenen Daten können unter Einbeziehung von Modellannahmen im Sinne einer Datenfusion kombiniert werden, um ein konsistentes Gesamtergebnis zu erhalten. Möglich ist z.B. die Verwendung von markscheiderischen Senkungsmodellen wie in (ODIJK 2005). Da

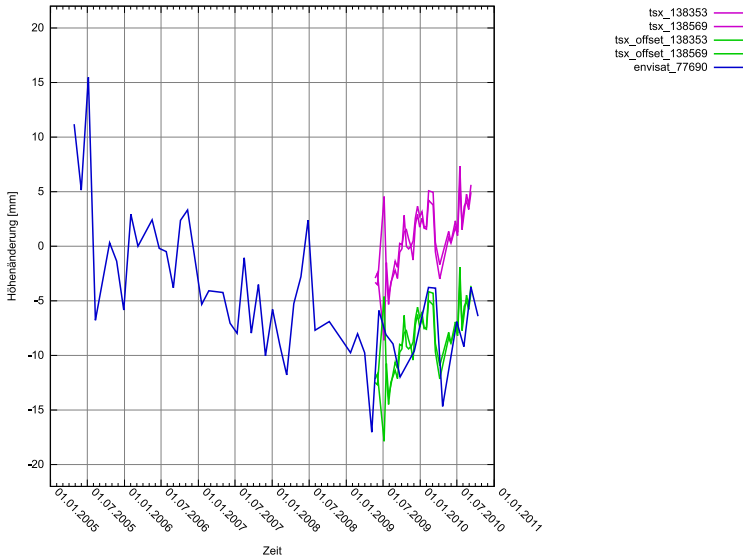


Abbildung 9: Offset-Korrektur: ENVISAT (blau), TerraSAR-X vor (magenta) und nach Korrektur (grün)

im Untersuchungsgebiet nur mit kleinen und möglicherweise unregelmäßigen Senkungen und Hebungen zu rechnen ist, wird ein allgemeinerer Modellierungs-Ansatz angestrebt, basierend auf Markov-Zufallsfeldern (markov random fields, MRFs).

In einem MRF werden ähnlich wie bei der klassischen Ausgleichsrechnung die gemessenen Werte als Beobachtungen aufgefasst, deren zugrunde liegende Unbekannte zu ermitteln sind. Neben der Gauss-Verteilung als Annahme für die Wahrscheinlichkeitsverteilung können auch andere Verteilungen für die Messwerte angenommen werden (LI 2001), so ist z.B. auch die Modellierung von in der Radarinterferometrie auftretenden Phasenmehrdeutigkeiten möglich (vgl. SHABOU, DARBON & TUPIN 2011). Neben der Abhängigkeit der Beobachtungen $d(S, P, T)$ zu den unbekannten Werten x können räumlich oder zeitlich benachbarte Werte x über vorgegebene bedingte Wahrscheinlichkeiten miteinander verknüpft werden. Dies erlaubt neben der Korrektur von evtl. auftretenden Phasensprungsfehlern ein adaptives Glätten der Werte. Die gesuchten Werte für die Unbekannten sollen die a-posteriori Wahrscheinlichkeit $P(x|d(S, P, T))$ des Zufallsfelds maximieren. Nach dem Satz von Hammersley-Clifford können MRFs auch als Gibbs-Feld dargestellt werden. Das Maximieren der a-posteriori Wahrscheinlichkeit entspricht hier dem Minimieren einer Energiefunktion $E(x)$.

$$P(x|d(S, P, T)) \propto \exp(-E(x))$$

In einer prototypischen Umsetzung ist die zu minimierende Energiefunktion durch eine ge-

wichtete Summe aus einem Datenterm und drei Glättungstermen definiert:

$$E(x) = w_1 E_{daten}(x) + w_2 E_{raum}(x) + w_3 E_{zeit}(x) + w_4 E_{ausw}(x)$$

Der Datenterm E_{daten} weist jeder Unbekannten einen Energiewert abhängig von der quadrierten Differenz zur Beobachtung zu. Stärkere Abweichungen von der Beobachtung führen zu einer höheren Energie und werden dadurch weitestgehend vermieden. Phasensprünge um ein Vielfaches der Radar-Wellenlänge sind zugelassen. Der Glättungsterm $E_{raum}(x)$ weist räumlich benachbarten Werten abhängig von der quadrierten Differenz ihrer Werte eine Energie zu, analog für $E_{zeit}(x)$. Dabei werden jeweils unterschiedliche Gewichte für die räumliche Distanz in Metern und den zeitlichen Abstand in Tagen verwendet. $E_{ausw}(x)$ weist räumlich und zeitlich benachbarten Werten unterschiedlicher Auswertungen eine Energie zu. Zur Minimierung der Energiefunktion wurde der deterministische ICM-Algorithmus (iterated conditional modes, BESAG 1986) verwendet, welcher ausgehend von einer Startlösung eine lokale Optimierung der Energiefunktion durchführt.

In Abbildung 10 ist das Ergebnis einer solchen Optimierung zu sehen. Die beiden gelben ENVISAT-Zeitreihen wurden unter Berücksichtigung benachbarter Werte geglättet. Inkonsistent aufgelöste Phasenmehrdeutigkeiten (Phasenzyklus ENVISAT: 30mm) am Ende der Zeitreihe wurden korrigiert. Die blau eingefärbten TerraSAR-X Zeitreihen wurden um einen berechneten Offset verschoben und ebenfalls geglättet und korrigiert (Phasenmehrdeutigkeit TerraSAR-X: 17mm).

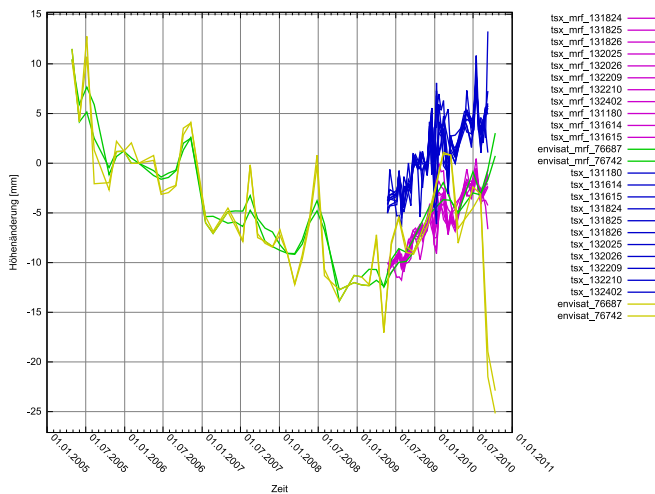


Abbildung 10: Korrektur der Phasenmehrdeutigkeit und adaptive Glättung durch Markov-Zufallsfeld: ENVISAT vorher (gelb) und nachher (grün), TerraSAR-X vorher (blau) und nachher (magenta)

5.5. Vergleiche mit Referenzdaten

Die Ergebnisse der Auswertungen wurden den Referenzdaten visuell gegenübergestellt. Im Allgemeinen war eine gute Übereinstimmung zu beobachten, Abbildung 11 zeigt exemplarisch den Vergleich zweier Objektmessungen mit umliegenden PSI-Punkten der ENVISAT-Auswertung.

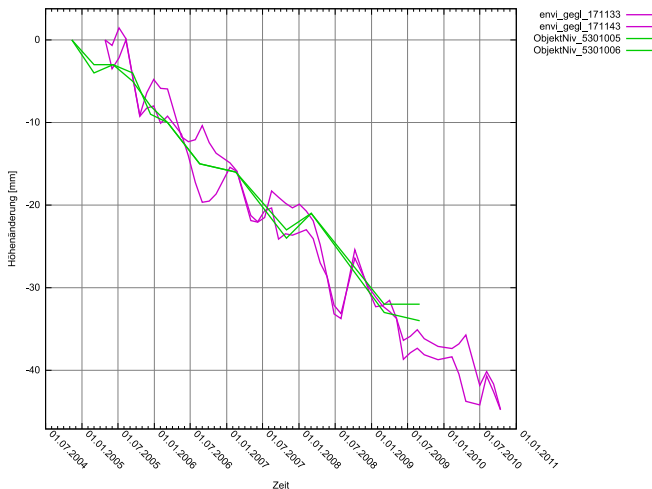


Abbildung 11: Exemplarischer Vergleich Objektmessungen (grün), ENVISAT PSI-Punkte (magenta)

Danksagung

Das Forschungsvorhaben „MultiSAR“ (FV-Nr. 15880 N) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Wir danken darüber hinaus der AiF Mitgliedsvereinigung Forschungsgemeinschaft Deutsche Braunkohlen-Industrie e.V. (FDBI) im Bundesverband Braunkohle (DEBRIV) für die Unterstützung des Forschungsvorhabens.

Die MIBRAG mbH und die LMBV mbH hat freundlicherweise das Forschungsvorhaben mit umfangreichen Referenzdaten, sowie einem digitalen Oberflächenmodell für die radarinterferometrischen Auswertungen unterstützt.

Das DLR e.V. stellte die TerraSAR-X Daten im Rahmen des TerraSAR-X Forschungsprojektes MTH 0528 zur Verfügung. Zudem wurde für die Radarinterferometrie ein vom DLR bereitgestelltes digitales Höhenmodell (SRTM-X) verwendet.

Die ESA stellte über das Category-1 Projekt Nr. 3085 Daten von ENVISAT ASAR zur Verfügung.

ALOS PALSAR Daten wurden über das ALOS ADEN AO Nr. 3576 bei der ESA von der JAXA bezogen.

Literatur

- BESAG, J. E. (1986). On the Statistical Analysis of Dirty Pictures, Journal of the Royal Statistical Society, Series B 48 (3), S. 259-302.
- HANNEMANN, W., BROCK, T. & BUSCH, W. (2011). GIS for combined storage and analysis of data from terrestrial and synthetic aperture radar remote sensing deformation measurements in hard coal mining. In: International Journal of Coal Geology 86 (2011) Issue 1, S. 54-57
- LEIJEN, F. & HANSSEN, R. F. (2004). Interferometric Radar Meteorology: resolving the acquisition ambiguity. In: Proc. of CEOS SAR Workshop, 27.-28.05.2004, Ulm.
- LI, S. Z. (2001). Markov Random Field Modeling in Image Analysis, 2nd ed. Springer-Verlag, New York.
- ODIJK, D. (2005). Integrating Leveling and InSAR Networks for the Monitoring of Subsidence Due to Gas Extraction. ZfV 130 (2005) H. 1, S. 30-41
- SCHADE, M. (2004). Vertikale Bodenbewegungen infolge des Grundwasser-Wiederanstieges im Zusammenhang mit der planmäßigen Flutung stillgelegter Braunkohlentagebaue. 44. Wissenschaftliche Tagung des DMV, 15.-18.09.2004, Bochum.
- SCHÄFER, M. (2012). Atmosphäre als Phasenbestandteil der differentiellen Radarinterferometrie und ihr Einfluss auf die Messung von Höhenänderungen. - Dissertation. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, im Druck.
- SHABOU, A., DARBON, J. & TUPIN, F. (2011). A Markovian Approach for InSAR Phase Reconstruction With Mixed Discrete and Continuous Optimization, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, Vol. 8, Nr. 3, S. 527-531.
- WALTER, D. (2011). Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle auf die Qualität radarinterferometrischer Bodenbewegungsmessungen. - Dissertation. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, im Druck.