

RADARINTERFEROMETRISCHE ERFASSUNG VON HÖHENÄNDERUNGEN IM BEREICH AKTIVER BRAUNKOHLETAGEBAUE IM SÜDRAUM LEIPZIG

*Michael Schäfer, Wolfgang Busch, Diana Walter, IGMC TU Clausthal
Christian Fischer, DFD DLR; Oliver Lohsträter, MIBRAG mbH*

ZUSAMMENFASSUNG

Gegenstand der Untersuchungen sind zwei im Abbau befindliche Tagebaue der Mitteldeutschen Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG) südlich von Leipzig. Präsentiert werden Ergebnisse eines Forschungsvorhabens, das die Eignung der Methode der satellitengestützten differentiellen Radarinterferometrie (DInSAR) zur Erfassung von Vertikalbewegungen der Tagesoberfläche im Bereich der Tagebaue untersuchen sollte. Die Höhenänderungen wurden mit einer selbstentwickelten Auswertemethode aus den differentiellen Interferogrammen abgeleitet, deren Eigenschaften noch weiter zu untersuchen sind.

Zur Evaluierung der Messergebnisse mit DInSAR standen Nivellementdaten zur Verfügung. Aus dem Vergleich der Ergebnisse beider Messverfahren kann für die mit DInSAR ermittelten Höhenänderungen eine Standardabweichung von drei Millimetern abgeleitet werden. Auch wenn sich mit dem DInSAR-Verfahren nicht für alle Gebiete und Zeitpunkte Aussagen machen lassen, so ermöglicht es die Ableitung umfangreicher Informationen über das räumliche und zeitliche Auftreten von Bodenbewegungen in guter Ergänzung zu den in großen Zeitabständen durchgeführten Nivellements dar.

ABSTRACT

Subject of the investigations are two open pit lignite mining sites operated by MIBRAG mbH in the south of Leipzig, Germany. We will present the results of a research project which was intended to investigate the suitability of spaceborne differential radar interferometry (DInSAR) for the acquisition of vertical ground movements in the surrounding of the mining sites. The DInSAR results have been generated with a self-developed method which has to be investigated further.

For the evaluation of the DInSAR results terrestrial leveling data were available. The comparison of the results originated by both approaches show a standard deviation of three millimeters for the height changes derived by DInSAR. Although not all regions and all points of time are suitable for DInSAR it is possible to get plenty information about the spatial extent of the ground movements. Therefore they are a good source for additional information in respect of rarely measured terrestrial levelings.

1 EINFÜHRUNG

Gegenstand der Untersuchungen sind zwei im Abbau befindliche Tagebaue der Mitteldeutschen Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG) südlich von Leipzig; der Tagebau Profen westlich des Flusses „Weiße Elster“ und der Tagebau „Vereinigtes Schleenhain“ östlich dieses Flusses (s. Abb. 1). In direkter Nachbarschaft der aktiven Tagebaue befinden sich aufgelassene Tagebaurestlöcher, die von der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) verwaltet und renaturiert werden. Infolge der seit Jahrzehnten bestehenden Entwässerung der aktiven Tagebaue, hat sich in Verbindung mit der kontrollierten Einstellung der Wasserhaltung und Flutung stillgelegter Tagebaue und der besonderen geologischen Verhältnisse eine komplexe Grundwassersituation entwickelt.

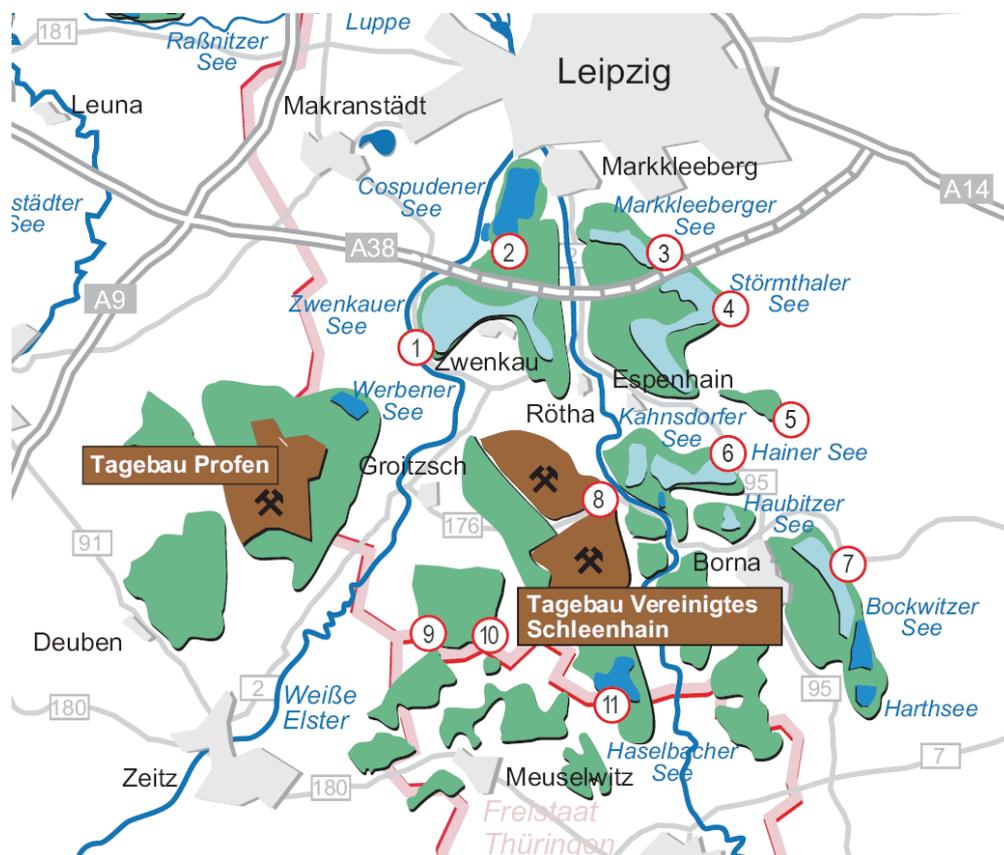


Abb. 1 : Untersuchungsgebiet mit aktiven (dunkelgrau) und aufgelassenen Tagebaufächen (mittelgrau), von denen manche bereits geflutet wurden (hellgrau).
Quelle: www.lmbv.de (mit freundlicher Genehmigung)

Da Änderungen in diesem komplexen Grundwassersystem nur schwer vorhersehbare Höhenänderungen an der Tagesoberfläche hervorrufen können, sollte im Rahmen des von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) finanzierten Forschungsvorhabens untersucht werden, ob die Methode der satellitengestützten differentiellen Radarinterferometrie (DInSAR) auch in diesem ländlich geprägtem Gebiet geeignet ist, die relativ kleinen Vertikalbewegungen der Tagesoberfläche zu erfassen.

Im Hinblick auf eine Untersuchung zur Gewinnung möglicher zusätzlicher Referenzinformationen wurden am IGMC Radarreflektoren (engl. Corner Reflectors) entwickelt, die eine fünfeckige (pentagonale) Flächengeometrie besitzen (SARABANDI & CHIU, 1996). Diese Konstruktion und ihre Fertigung aus Aluminium erlaubt die Herstellung von 33 % leichteren Reflektoren im Gegensatz zu herkömmlichen trigonalen Corner Reflektoren mit dreieckigen Seitenflächen, bei gleichzeitiger Verbesserung der Rückstreueigenschaften. Zu Beginn des Projektes wurden zwölf dieser Radarreflektoren angefertigt und im Untersuchungsgebiet verteilt aufgestellt.



Abb. 2 : Radarreflektor am nördlichen Rand des Braunkohlentagebaus Profen

2 DATENGRUNDLAGE FÜR DIE UNTERSUCHUNGEN

2.1 Radar-Daten

Als Datenquelle für die Radar-Daten wurde der Sensor ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) an Bord des Satelliten ENVISAT (Environmental Satellite) der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA verwendet. Dieser C-Band-Sensor (5,6 cm Wellenlänge) erreicht eine Bodenauflösung von ca. 20 m (bei einem Multilooking von 1:5). Die zeitliche Wiederholrate für interferometrisch kombinierbare Szenen beträgt dabei 35 Tage. Die aufgenommenen Szenen decken einen ca. 100*100 km² großen Bereich der Erdoberfläche ab (s. Abb. 3).

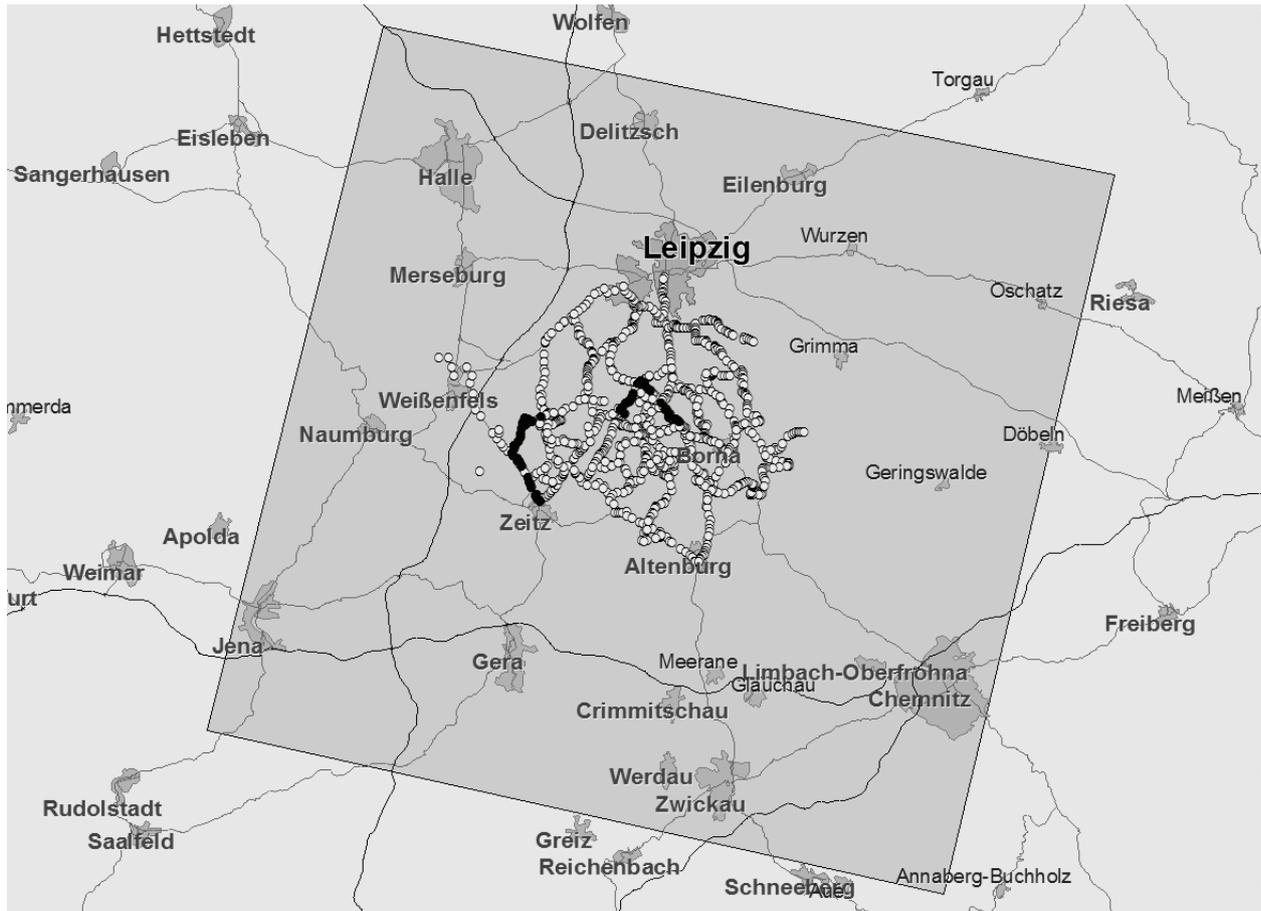


Abb. 3 : Bereich der Abdeckung der für das Projekt verwendeten ENVISAT ASAR-Szenen (Track 437, Swath IS2, Frame 2574). Im Südraum von Leipzig sind zusätzlich der Verlauf des Reviernivellements von MIBRAG und LMBV (weiße Punkte) sowie der im Rahmen des Projektes durchgeführten Verdichtungsmessungen (schwarze Punkte) dargestellt.

ENVISAT wurde am 1. März 2002 gestartet. Da der Satellit nur auf Bestellung Daten aufzeichnet, sind zeitlich zurückliegende Szenen meist nur in Einzelfällen in den Archiven der ESA vorhanden. So lagen für das Untersuchungsgebiet lediglich 6 ENVISAT ASAR Szenen für den Zeitraum von 2002 bis Anfang 2005 vor.

Die kontinuierliche Aufzeichnung (alle 35 Tage) aktueller Satellitenszenen wurde ab April 2005 in Auftrag gegeben. Diese ab Frühjahr 2005 verbesserte Datenlage hat sich im Nachhinein als sehr vorteilhaft herausgestellt. So kann es mitunter vorkommen, dass eine Szene (aus technischen Gründen) nicht aufgezeichnet wird oder wegen technischer Fehler nicht verwertbar ist. Außerdem kann es aufgrund von zeitweisen Bahnabweichungen des Satelliten zu Abweichungen in der Aufnahmegeometrie kommen, die ab einer gewissen Größenordnung die interferometrische Auswertung unmöglich machen (s. Abschnitt 3.1). Hierdurch entfallen Aussagen über Höhenänderungen in einem bestimmten Zeitraum. In einem solchen Fall sind zwei andere Szenen mit einer besser übereinstimmenden Aufnahmegeometrie zu finden, wodurch sich der Zeitraum, für den Höhenänderungen ermittelt werden können, vergrößert oder verkleinert.

2.2 Referenz-Daten

Zur Evaluierung der mit Radarinterferometrie gewonnenen Ergebnisse standen Daten der von der MIBRAG und LMBV im zweijährigen Rhythmus durchgeführten Revier- und Ortslagen-Nivellements zur Verfügung. Zudem wurden zwei Teilstrecken des Reviernivellements mit 16 km und 13 km Länge dreimal während der Projektlaufzeit in zeitlich engeren Abständen gemessen, um parallel zu den programmierten Radar-Szenen Vergleichsmessungen zu erhalten (s. a. Abb. 3). Diese Messungen erfolgten zu den Zeitpunkten Dezember 2005, Mai 2006 und März 2007. In Verbindung mit der Messung des Reviernivellements im Mai 2005 ergeben sich damit zeitliche Abstände von ca. 7, 5 und 10 Monaten zwischen den Messungen.

Bei der zu Beginn des Projektes getroffenen Auswahl der häufiger gemessenen Verdichtungslinien war darauf geachtet worden, dass diese Nivellementlinien durch bebaute Bereiche und Dörfer verlaufen, da vermutet wurde, dass die Radarinterferometrie die zuverlässigsten Ergebnisse in diesen Bereichen liefern würde. Zudem sollten die für die zusätzlichen Nivellements ausgewählten Gebiete geringe Höhenänderungen aufweisen, um eine Evaluierung des Potentials der Radarinterferometrie auch für Gebiete mit geringen Bewegungsraten durchführen zu können. Zudem sollte bei der Auswahl der Teilstrecken darauf geachtet werden, dass ihre Anschlusspunkte in den Zeiträumen zwischen der Durchführung der Reviernivellements keine Höhenänderungen erfahren werden.

Als zusätzliche Referenzdaten wurden digitale Höhenmodelle (TINs aus Hochbefliegungen) der MIBRAG und ein SRTM-C-Höhenmodell der „Shuttle Radar Topography Mission“ verwendet, die miteinander kombiniert für die differentielle Radarinterferometrie eingesetzt wurden. Des Weiteren standen diverse Luftbilder der Hochbefliegungen und topographische Karten zu Visualisierungszwecken zur Verfügung.

3 METHODIK UND PROBLEME DER RADAR-DATENAUSWERTUNG

Die Auswertung der RADAR-Daten erfolgte mittels der „Gamma SAR and Interferometry Software“ von der Firma Gamma Remote Sensing, Schweiz. Die Daten wurden zunächst von Rohdaten (ASAR Level 0 Produkt) zu „Single Look Complex“ (SLC) Daten prozessiert. Anschließend erfolgte eine präzise Koregistrierung der Szenen auf die Geometrie einer Referenzszene. Mit diesen koregistrierten SLC-Szenen können Interferogramme berechnet werden. Um Verformungen der Erdoberfläche zu messen, benötigt man differentielle Interferogramme. Diese wurden nach der „Two Pass“ Methode erzeugt, welche ein digitales Höhenmodell der Geländeoberfläche erfordert, um die topographiebedingten Phasenanteile aus den Interferogrammen zu entfernen. Als Höhenmodell wurde ein Mosaik aus Höhendaten der MIBRAG im Zentralbereich und SRTM-C-Daten in der weiteren Umgebung verwendet.

Die Hauptprobleme der differentiellen Interferometrie sind zum einen A) Verluste der interferometrischen Kohärenz zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten und zum anderen B) unerwünschte Phasenanteile, die zu einer Verschiebung der Deformationsphasenwerte führen. Diese Probleme sollen im Folgenden weiter erläutert werden.

A) Kohärenzverluste treten überwiegend durch zu große Änderungen in der Oberflächenbeschaffenheit zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten auf (temporale Dekorrelation). Aufgrund der geringen Wellenlänge der verwendeten Radarstrahlung von 5,6 cm führen bereits geringe Änderungen der Erdoberfläche, wie beispielsweise durch Vegetationswachstum oder durch Ackerbau zu einem Kohärenzverlust infolge temporaler Dekorrelation. Auch Witterungseinflüsse wie eine unterschiedliche Bodenfeuchte oder Schneebedeckung können eine Rolle spielen. Dieser Einfluss ist je nach Gebiet (und Jahreszeit) unterschiedlich; so weisen z. B. Stadtgebiete auch bei größeren Zeitabständen eine sehr gute Kohärenz auf. Vegetationsbestandene Flächen können zu gewissen Jahreszeiten bei geringen zeitlichen Abständen eine gute Kohärenz aufweisen, z. B. im Spätherbst mit seinen geringen Wachstumsänderungen; in der Regel sind vegetationsbestandene Flächen für die radarinterferometrische Ermittlung von Höhenänderungen nicht geeignet. Wasserflächen, wie z. B. in aufgelassenen Tagebaurestlöchern, treten immer als dekorrelierte Flächen in Erscheinung.

Eine weitere Ursache für Kohärenzverluste entsteht im Fall einer ungünstigen (leicht unterschiedlichen) Aufnahmegeometrie zwischen den zwei Aufnahmezeitpunkten (geometrische Dekorrelation). Ursache ist hier eine zu große senkrechte Basislinie (Perpendicular Baseline) zwischen den Satellitenpositionen zu zwei Aufnahmezeitpunkten. Mitunter wurden senkrechte Basislinien von bis zu 1500 Metern zwischen den Szenen gemessen. Wenn auch theoretisch erst ab einer senkrechten Basislinie von ca. 1100 m ein völliger Kohärenzverlust vorliegt (im C-Band), so erschweren auch bereits Interferogramme mit senkrechten Basislinien von 500 m eine Auswertung durch den immer stärker zunehmenden Kohärenzverlust sehr.

B) Die unerwünschten Phasenverschiebungen in differentiellen Interferogrammen können ihre Ursachen in verschiedenen Fehlerquellen haben, die zusammengenommen die gesuchte Deformationsphase verfälschen:

1. Ungenaue (und nicht aktuelle) digitale Höhenmodelle können zu einer fehlerhaften Korrektur des topographischen Phasenanteils führen,
2. ungenügend genaue Informationen über die Position des Satelliten zu den Aufnahmezeitpunkten (sog. Orbitfehler) führen zu residualen Phasenrampen, die gleichmäßig über das gesamte Interferogramm verlaufen,
3. Laufzeitunterschiede der elektromagnetischen Wellen können infolge unterschiedlicher atmosphärischer Zustände zu lokalen Phasenverschiebungen führen.

Die ersten beiden Fehlerquellen können relativ einfach identifiziert werden und lassen sich zudem weitestgehend vermeiden durch die Verwendung eines exakten digitalen Höhenmodells, sowie durch die Verwendung hochpräziser Orbitdaten. Die „lokalen“ Phasenverschiebungen werden verursacht durch Änderungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen infolge zeitlich und räumlich unterschiedlicher Brechungskoeffizienten des durchlaufenden Mediums. In der Atmosphäre sind dies lokale Änderungen des Wasser(dampf)gehalts, wie z. B. durch Wolken oder Regen (HANSEN et al., 1998). Sie können sich in Form eines linearen Phasentrends äußern, treten aber oft unregelmäßig in einer Ausdehnung von vielen hundert Metern bis zu Dutzenden von Kilometern auf, wobei sie durch eine starke räumliche Korrelation charakterisiert sind.

Im Fall von linearen atmosphärischen Phänomenen wie z. B. Wetterfronten wurden vereinzelt Phasenverschiebungen von bis zu 4π über eine Entfernung von 100 km beobachtet, was einer

relativen vertikalen Bodenbewegung von ca. 6 cm über diese Entfernung entsprechen würde. Aus diesem Grund müssen die differentiellen Interferogramme um diese Fehlerquelle korrigiert werden. Für diesen Zweck wurde ein Programm in der Programmiersprache IDL entwickelt, welches die räumlich korrelierenden Phasenanteile gewichtet innerhalb einer Kreisfläche von 10-30 km Durchmesser ermittelt und das Interferogramm entsprechend korrigiert (vgl. SCHÄFER et al., 2007):.

Die Anwendung dieses Filters bedarf einer gewissen Vorsicht, da vorher geprüft werden muss, ob im Untersuchungsgebiet großflächige und detektierbare Vertikalbewegungen mit Ausmaßen von über 20 km im Durchmesser auftreten könnten und sie somit herausgefiltert würden. Demgegenüber gehen kleinräumige Bodenbewegungen zu einem gewissen Anteil mit in die Filterung ein, so dass ein leicht fehlerhafter atmosphärischer Anteil korrigiert wird. Dies kann zu einer leichten Unterschätzung der tatsächlichen Senkung bzw. Hebung dieser bewegten Stellen (in Abhängigkeit von der Filtergröße) führen.

Nichtsdestotrotz bietet das entwickelte Korrekturverfahren große Vorteile bei der Auswertung der Interferogramme. Ohne Korrektur wäre eine Anwendung der differentiellen Interferometrie im Untersuchungsgebiet aufgrund der sehr kleinen auftretenden Bewegungen fast völlig undenkbar, da die Messwerte der einzelnen Interferogramme nicht miteinander verglichen oder gar verrechnet werden könnten, um zum Beispiel Aussagen über einen größeren Zeitraum treffen zu können. Ohne Korrektur ist die Notwendigkeit der visuellen Interpretation der Interferogramme durch einen erfahrenen Auswerter sehr viel größer.

An den so korrigierten differentiellen Interferogramme wurde nach einer schwachen räumlichen Filterung eine Phasenfortsetzung bzw. Phasenabwicklung (engl. Phase Unwrapping) durchgeführt. Dieser Prozess versucht die Mehrdeutigkeiten der interferometrischen Phasenwerte, die nur in einem Bereich zwischen $-\pi$ und $+\pi$ gültig sind, aufzulösen. Man erhält eindeutige („abgewickelte“) Werte in Bogenmaß, die sich direkt in einen vertikalen Bewegungsanteil (in z. B. Millimeter) umrechnen lassen.

Da nämlich die terrestrisch erhobenen Daten meistens weitaus größere zeitliche Abstände besitzen als die Interferogramme, wurden für eine bessere Vergleichsmöglichkeit mehrere zeitlich aufeinander folgende Interferogramme miteinander in einem selbst entwickelten Verfahren verrechnet. Mit Hilfe eines solchen Stapels von Interferogrammen können bessere (flächendeckendere) Aussagen über gewisse Zeitabstände getroffen werden, als dies aus den oben beschriebenen Gründen (Kohärenzverluste durch temporale Dekorrelation) mit einem einzelnen Interferogramm über diesen Zeitraum möglich wäre, vor allem im Bereich der Ortschaften und der Tagebaue. Die Wahl des Zeitraumes und der verwendeten Interferogramme für die Stapelung hängt also stark von der gewünschten zu treffenden Aussage über einen Zeitraum ab.

Auf diese Weise wurden Messwerte für alle Zeitpunkte in einem Abstand von 35 Tagen für eine Zeitreihe zwischen Mai 2005 und Juni 2007 berechnet. Für einige Zeitpunkte, für die keine Radardaten zur Verfügung standen oder für die die Aufnahmeparameter ungeeignet waren, wurde mittels einer Mittelung Werte aus den davor und dahinter liegenden Zeitpunkten berechnet. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, Zeit-Bewegungs-Diagramme über alle Zeitpunkte für jeden Punkt in einem kohärenten Gebiet darzustellen (s. a. Abb. 4). Des Weiteren ist es auch möglich, die relativen Bewegungen für einen Zeitraum entlang einer Nivellementlinie

darzustellen. Für den folgenden Vergleich der zwei Messverfahren wurden anhand der Lage der Nivellementpunkte Werte aus dem Rasterbildern des DInSAR-Stapels extrahiert. Dabei wurden die den Nivellementpunkt umgebenden Pixel interpoliert. Mit den so gewonnenen Werten konnten direkt Differenzen zwischen den beiden Messverfahren gebildet werden.

4 ERGEBNISSE DER DATENAUSWERTUNG

4.1 Ergebnisse anhand der differentiellen Interferogramme (DInSAR)

Bei der Berechnung der differentiellen Interferogramme können beliebige zeitliche Kombinationen gewählt werden. Dabei müssen jedoch die in Abschnitt 3 aufgeführten Einschränkungen bezüglich der temporalen und geometrischen Dekorrelation berücksichtigt werden, da die Interferogramme ansonsten nicht genügend flächenhafte Kohärenz aufweisen.

Die Interferogramme zeigen für Flächen mit Städten und Dörfern eine gute Kohärenz, für Wiesen- und Ackerflächen lassen sich nur selten (und wenn, dann nur im Spätherbst oder Winter) Aussagen über Bewegungen treffen. Für den Bereich der untersuchten Braunkohletagebaue treten überwiegend hohe Kohärenzen auf, vor allem im Bereich der stillgelegten Tagebaue, die meist nur spärlich mit Vegetation bewachsen sind. Die aktiven Tagebaubereiche weisen aus verständlichen Gründen nur selten eine Kohärenz zwischen zwei Zeitpunkten auf. Hier ist es meist nur möglich, für ihre Randbereiche Aussagen über Bodenbewegungen zu treffen.

Generell ist in den Tagebaubereichen schon bei sehr viel kürzeren Zeitabständen mit temporaler Dekorrelation zu rechnen als beispielsweise in städtischen Bereichen. Deshalb mussten für dieses Projekt überwiegend Interferogramme mit sehr kurzen Zeitabständen verwendet werden, die anschließend als Stapel miteinander verrechnet wurden. Dadurch wurde es möglich, für diese Gebiete flächendeckendere Aussagen über längerfristige Bodenbewegungen zu erhalten.

Die ermittelten Höhenänderungen sind überwiegend klein und betragen selbst in den Tagebaubereichen bis auf wenige Ausnahmen nicht mehr als einen Zentimeter pro Jahr (cm/a). In den städtischen und dörflichen Bereichen sind ausnahmslos geringere Bewegungsraten beobachtet worden.

In einigen Randgebieten der aktiven Tagebaue Profen und Vereinigtes Schleenhain, die eine gute Kohärenz aufweisen, treten zum Teil Senkungsraten von bis zu 2 cm/a auf (s. a. Abb. 4). Demgegenüber weisen Randbereiche von Tagebaurestlöchern erwartungsgemäß eher Hebungen von bis zu 1 cm/a auf.

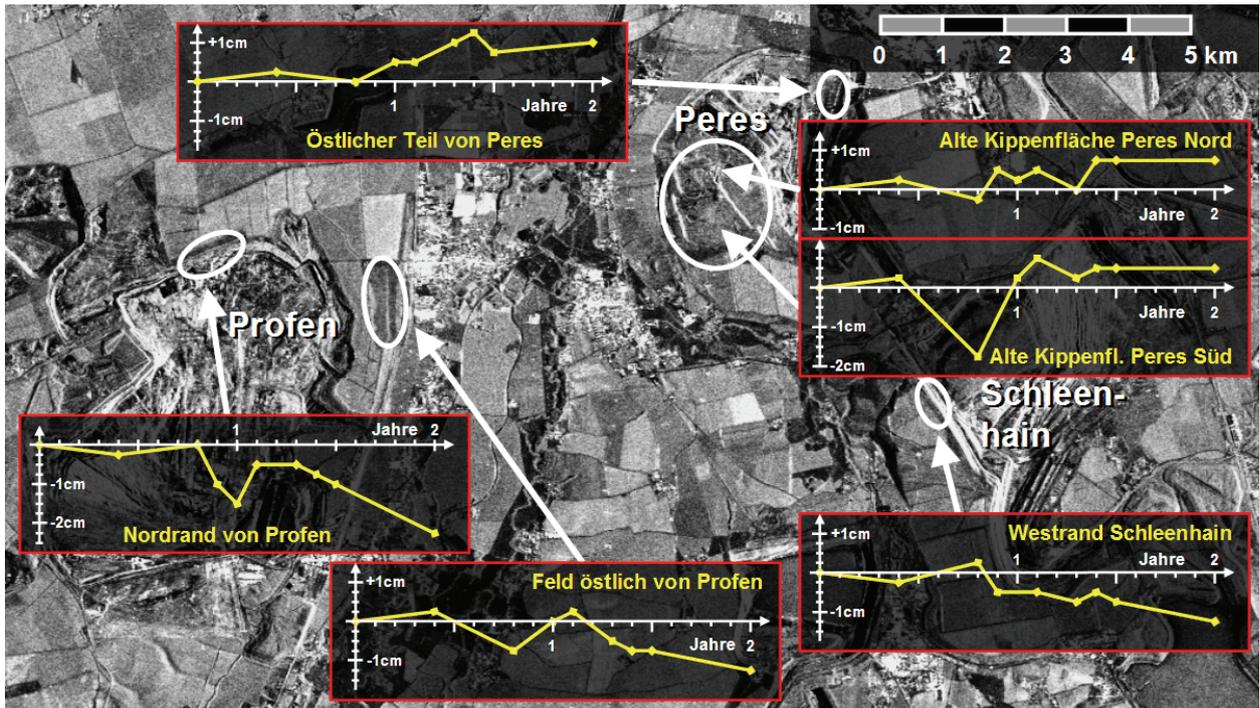


Abb. 4 : Radar-Intensitätsbild mit Zeit-Bewegungsdiagrammen für ausgewählte Gebiete (Ellipsen), in denen innerhalb von ca. zwei Jahren größere Bewegungen stattgefunden haben (Zeitraum 22.07.2004 – 22.06.2006, Hebungen positiv)

In den übrigen Gebieten sind die vertikalen Bodenbewegungen eher ungleichmäßig. Oftmals wechseln sich zeitlich Hebungen und Senkungen ab. So können durchaus zwischen dicht beieinander liegenden Zeitpunkten (z. B. 35-70 Tage) größere Bewegungen beobachtet werden, die sich jedoch im direkt anschließenden Beobachtungszeitraum wieder teilweise oder sogar vollständig aufheben. Ein extremes Beispiel hierfür ist eine alte Kippenfläche im ehemaligen Tagebau Peres (s. Abb. 4), die in einem Zeitraum von weniger als 140 Tagen eine Senkung um 2 cm aufweist, die bereits nach weiteren 70 Tagen vollständig durch Hebungen wieder aufgehoben wurde. Leider stehen für diesen Zeitraum nicht mehr Radardaten zur Verfügung, so dass die Bewegungen zeitlich nicht genauer eingeschränkt werden konnten. In den darauf folgenden zwei Jahren weist diese Kippenfläche lediglich noch leichte Hebungen und Senkungen im Bereich weniger Millimeter auf.

4.2 Ergebnisse der terrestrischen Nivellements

Aufgrund des großen zeitlichen Abstands von zwei Jahren zwischen den beiden zur Zeit vorliegenden Reviernivellements (in 2003 und 2005) und der geringen Anzahl von Radaraufnahmen für diesen Zeitraum, erfolgte eine auf die drei zeitlich verdichteten Messungen der beiden Teilstrecken konzentrierte Auswertung (siehe Abb. 3). Es ist jedoch vorgesehen, nach Fertigstellung des für 2007 geplanten Reviernivellements einen Vergleich der radarinterferometrischen Ergebnisse mit dem gesamten Reviernivellement durchzuführen.

Die Auswertung der drei Nivellements erfolgte bezogen auf die Referenzmessung des Reviernivellements im Mai 2005. Dabei hat sich gezeigt, dass die Prognosen hinsichtlich der Größe der Höhenänderungen zutreffend waren.

So ergaben sich für die westliche Verdichtungsmessung maximale Höhenänderungen von 10 mm über den gesamten Zeitraum (Mai 2005 – März 2007) und für den Zeitraum zwischen Mai 2005 und Mai 2006 von 6 mm. Alle Höhenänderungen im Bereich der westlichen Linie erwiesen sich als Hebungen, die für die meisten Punkte bereits in den ersten 7 Monaten (von Mai 2005 bis Dezember 2005) auftreten. In den darauf folgenden Zeiträumen sind die Höhenänderungen geringer, setzen aber die Hebungstendenzen an den meisten Punkten fort. Auffallend sind Höhenänderungen der Punkte auf den ersten ca. 3,5 Kilometer der westlichen Linie, die im Zeitraum Mai 2006 bis März 2007 eine deutliche Zunahme der Hebung um 4-5 mm erfahren haben. Der Vergleich des Bewegungsverhaltens dieses Bereiches mit dem nachfolgenden Bereich der Nivellementlinie weist auf eine lokal begrenzte Ursache hin.

Im Bereich der östlichen Nivellementlinie fallen die gemessenen Höhenänderungen mit maximal ca. 4 mm sehr viel geringer über den gesamten Zeitraum (von Mai 2005 bis März 2007) aus. Hier ergaben sich Bereiche mit Senkungen von etwa 4 mm und Bereiche mit Hebungen von meist kleiner als 2 mm. Dabei sind keine Bereiche mit Bewegungstrends zu erkennen.

5 VERGLEICH DER DINSAR-AUSWERTUNGEN MIT DEN TERRESTRISCHEN NIVELLEMENTS

Der Vergleich der beiden Messverfahren wird erschwert durch abweichende Messzeitpunkte und durch die geometrisch sehr unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Messung.

So erfolgten die einzelnen Messungen nie völlig zeitgleich. Generell ist bei einem Abstand von 35 Tagen zwischen den Satellitenüberflügen mit einer maximalen Zeitdifferenz von 17 Tagen zu einer Nivellementmessung zu rechnen. Falls jedoch Szenen aus diversen Gründen nicht für die Auswertung zur Verfügung stehen oder geeignet sind (vgl. Abschnitt 3.1), so kann die Zeitdifferenz deutlich größer werden. Dies wird immer in einer gewissen Unsicherheit der Ergebnisse eines solchen Messwertvergleichs resultieren.

Des Weiteren ergeben sich Schwierigkeiten, die Ergebnisse eines punkthaften Messverfahrens (Nivellement) mit denen eines flächenhaften Messverfahrens (differentielle Radarinterferometrie) zu vergleichen. So weisen die flächenhaft vorliegenden Messwerte des DInSAR-Verfahrens eine gewisse Streuung auf (unter anderem durch den so genannten „Speckle Effekt“). Dies führt zu räumlich schwankenden Phasenwerten in den differentiellen Interferogrammen, welche mit einer Filterung ausgeglichen werden können. Je nachdem, welche Filter-Algorithmen und Parameter (vor allem bezüglich der Filtergröße) verwendet werden, können die so gemittelten Phasenwerte deutlich voneinander abweichen. Bei den hier vorgestellten Ergebnissen wurde eine adaptive Filterung mit einer variablen Filtergröße verwendet, welche sich nach der lokal geschätzten Kohärenz des Interferogramms richtet. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass in den Randbereichen von kohärenten Flächen aufgrund der kleiner werdenden Filtergröße zunehmend stark voneinander abweichende Phasenwerte auftreten. Aus diesem Grund wurden (Nivellement-) Punkte in diesen Randbereichen (und natürlich auch die in kohärenzlosen Flächen) nicht für den Vergleich verwendet.

Die Nivellementpunkte besitzen im Mittel Abstände von ca. 600 Metern entlang der Verdichtungsstrecken, mit Maximalwerten von bis zu zwei Kilometer. Demgegenüber besitzen die differentiellen Interferogramme Auflösungszellen von 20 * 20 Metern. Die DInSAR-Ergebnisse lassen daher die Bewegungen der Erdoberfläche (in kohärenten Bereichen) weitaus differenzierter erscheinen, als dies anhand der Nivellementpunkte möglich wäre. Ob diese Beobachtungen wirklich der Realität entsprechen, und welche natürlichen Ursachen dafür bestehen könnten, ist momentan ungeklärt. Jedoch verdeutlicht dies die Wichtigkeit einer exakten Georeferenzierung der Radardaten, damit die räumliche Lage eines Nivellementpunktes der richtigen Stelle im Interferogramm zugeordnet werden kann. Dabei bleibt jedoch zu bedenken, dass die zwar hochgenau in ihrer Höhe bestimmten Nivellementpunkte oftmals nur mit sehr geringer Genauigkeit (um die 5-10 m) in ihrer Lage bekannt sind. Dennoch bleibt zu bedenken, dass es die Radarinterferometrie nicht vermag, die Höhenänderung eines konkreten (mit einem Höhenbolzen vergleichbaren) Punktes der Erdoberfläche zu bestimmen. Vielmehr werden sämtliche innerhalb einer Auflösungszelle auftretenden Objekte bei der Messung berücksichtigt.

In Abbildung 5 dargestellt ist der Vergleich zwischen den mit beiden Verfahren gemessenen Höhenänderungen für die längste Zeitdifferenz zwischen Mai 2005 und März 2007 in Form eines Streudiagramms („Scatter Plot“). Für diesen Zeitraum wurden mittels Nivellement größte Höhenänderungen von über 10 mm gemessen.

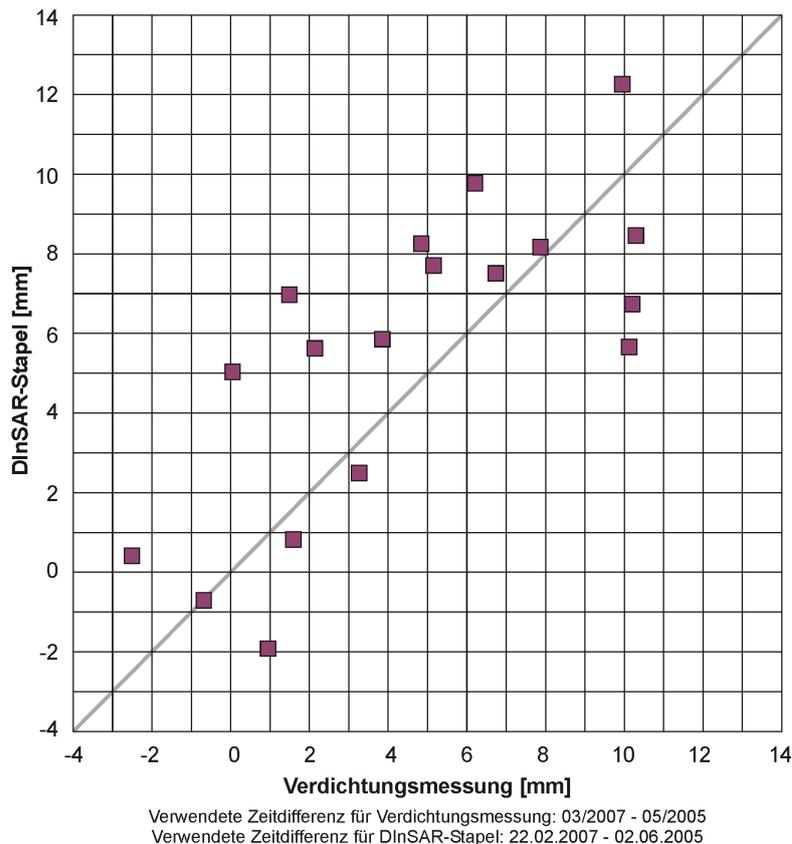


Abb. 5 : Gegenüberstellende Darstellung der mit den zwei Messverfahren ermittelten Höhenänderungen anhand der Nivellementpunkte beider Verdichtungslinien (West und Ost) für eine annähernd gleiche Zeitdifferenz

Abbildung 5 zeigt deutlich die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Messverfahren. Da die per Nivellement beobachteten Höhenänderungen überwiegend sehr klein sind (kleiner 10 mm) werden die Abweichungen zudem besonders offensichtlich. Gäbe es keine Unterschiede in den Ergebnissen, so würden alle Punkte entlang der eingezeichneten diagonalen Linie liegen. Die vertikalen Abstände zu dieser Linie zeigen die Abweichungen zwischen den Messwerten an. Als Beispiel sei ein Punkt genannt, der bei der Nivellementmessung mit einer Hebung von 1 mm gemessen wurde. An der Stelle dieses Punktes wurde mittels des DInSAR-Verfahrens eine Senkung von fast 2 mm gemessen. Die im Folgenden als Differenz zwischen Nivellementmessung und DInSAR-Messung angegebene Abweichung beträgt somit plus 3 mm.

Für diese längste Zeitdifferenz ergeben sich – wie in Abbildung 5 ersichtlich – betragsmäßige Abweichungen zwischen den Messverfahren von maximal 5,5 mm. Die durchschnittlichen Abweichungen aller 18 Punkte belaufen sich auf < 3 mm.

Abbildung 6 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Unterschiede zwischen den Messergebnissen beider Messverfahren (Nivellement minus DInSAR). Hierbei wurden die Messwerte der drei Verdichtungsmessungen (Zeitdifferenzen 05/2005 – 12/2005, 05/2005 – 05/2006 und 05/2005 – 03/2007) für beide Nivellementlinien (West und Ost) zusammen genommen berücksichtigt. Dazu wurden die Differenzen in zehn gleichgroße Klassen eingeteilt. Die auf insgesamt 62 Differenzen basierende Darstellung zeigt eine Normalverteilung der Abweichungen zwischen den beiden Messverfahren.

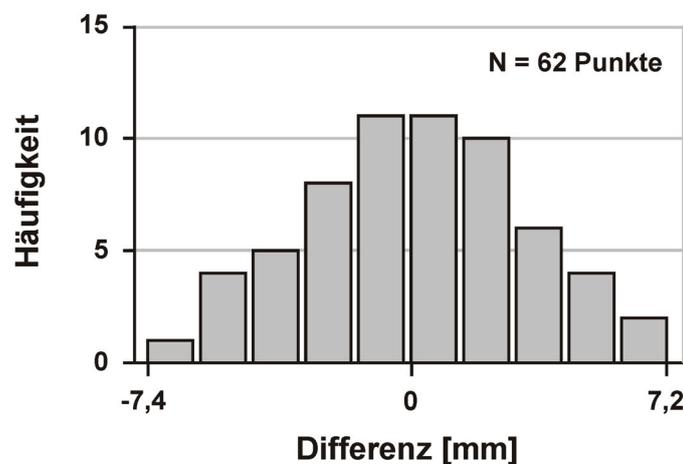


Abb. 6 : Häufigkeitsverteilung aller Unterschiede zwischen den nivellistisch und mittels DInSAR bestimmten Höhenänderungen, für alle drei Zeitdifferenzen zusammengefasst (insgesamt 62 verglichene Messungen)

Für die in Abbildung 6 dargestellten Differenzen ergibt sich ein Mittelwert von nahezu Null Millimeter bei einer Standardabweichung von 3 mm. Es kommen maximale betragsmäßige Abweichungen zwischen den Messwerten beider Verfahren von bis zu 7,4 mm vor. Nimmt man die nivellistisch bestimmten Höhenänderungen als fehlerfrei an („wahre“ Werte), kann die aus einer Stichprobe von 62 Werten abgeleitete Standardabweichung von 3 mm als Genauigkeit der mit der DInSAR – Methode ermittelten Höhenänderungen interpretiert werden.

Dieses Ergebnis kann unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 erwähnten Probleme bei der Auswertung mittels des DInSAR-Verfahrens und der Schwierigkeiten des Vergleichs der Messverfahren als plausibel angesehen werden.

6 ABSCHLIESSENDE BEMERKUNGEN UND AUSBLICK

Im gesamten Untersuchungsgebiet treten nur sehr geringe vertikale Bodenbewegungen über lange Zeiträume auf. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, auch über längere Zeitabstände Aussagen über Bodenbewegungen in einem ländlich geprägten Untersuchungsgebiet treffen zu können. Das vorgestellte Forschungsvorhaben ergab, dass die Ergebnisse zwischen terrestrischen Nivellementmessungen und den Auswertungen der Radardaten eine Übereinstimmung zeigen. Aus den Abweichungen zwischen den mit DInSAR ermittelten Höhenänderungen und den als fehlerfrei angenommenen nivellistischen Höhenänderungen ergibt sich eine Standardabweichung von drei Millimetern für die radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungen.

Bis zu einer sicheren und geprüften Verwendung der DInSAR-Methoden bedarf es noch weiterer Untersuchungen und Verbesserungen. Vor allem gilt es zu klären, in welchem Maße die durchgeführte Atmosphärenkorrektur und andere Verarbeitungsschritte wie zum Beispiel die räumliche Filterung der Daten zu Abweichungen in den Messergebnissen führen können. Vor allem der Vergleich zwischen einem DInSAR-Stapel und den Daten des Reviernivellements Ende 2007 wird hierüber wahrscheinlich weitere Aufschlüsse geben, da dann mit noch mehr Nivellementpunkten (auch über die Fläche verteilt) eine statistische Aussage erfolgen kann.

Nur für einen Teil der Nivellementpunkte der Verdichtungsmessungen war es möglich, einen Messwert aus dem DInSAR-Stapel zu entnehmen. Mit zunehmender Zeitdifferenz verringert sich die Größe der kohärenten Flächen und folglich nimmt auch die Anzahl der für einen Vergleich verfügbaren (Nivellement-) Punkte ab. Von einem solchen punkthaften Vergleich abgesehen bieten die DInSAR-Daten jedoch zusätzlich die Möglichkeit, die Bewegungen der Erdoberfläche (in kohärenten Bereichen) flächenhaft zu ermitteln. Allerdings sind die natürlichen Ursachen für viele der mit der differentiellen Radarinterferometrie beobachtbaren, in kurzen Zeitabständen auftretenden kleinräumigen Senkungen und Hebungen momentan noch weitestgehend unklar.

Ergänzend zum klassischen DInSAR-Verfahren hat sich ein anderes Auswerteverfahren der differentiellen Interferometrie etabliert, die so genannte „Persistent Scatterer Interferometry“ (PSI), was so viel wie „Interferometrie mit wiederkehrenden Punktstreuern“ bedeutet. Dabei werden langzeitstabile Rückstreuer (natürliche und künstliche Reflektoren wie z. B. Häuser, Brücken, Masten und Corner Reflektoren) in einer großen Zeitreihe von Radardaten mit statistischen Methoden identifiziert und ihre Höhenänderungen gemessen. Dabei findet eine Netzausgleichung zwischen den Punktstreuern statt, um den räumlichen Bezug zwischen den Punkten zu berücksichtigen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, die Einflüsse der Atmosphäre direkt abschätzen und korrigieren zu können.

In Zukunft sollen bezüglich der herkömmlichen DInSAR-Auswertemethoden sowohl die hier dargestellte Stapelungs-Methode, als auch die Korrektur der atmosphärischen Phasenanteile ver-

bessert und weitergehend untersucht werden. Parallel sollen die Radardaten jedoch auch mit einem PSI-Verfahren prozessiert werden, um die so gewonnenen Ergebnisse zu ergänzen und zu vergleichen.

7 DANKSAGUNG

Das vorgestellte Forschungsvorhaben (Vorhaben Nr. 14354 N) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert und von der MIBRAG mbH durch die Bereitstellung umfangreicher Referenzdaten und Nivellements unterstützt.

Ein Teil der verwendeten Radardaten wurde über das von der Europäischen Raumfahrtorganisation (ESA) geförderte Cat-1 Vorhaben Nr. 3085 zur Verfügung gestellt.

8 LITERATUR

- SARABANDI, K., CHIU, T.C. (1996): Optimum Corner Reflectors Design. – Proc. IEEE National Radar Conf., Ann Arbor, Michigan.
- HANSSEN, H., ZEBKER, H., KLEES, R., BARLAG, S. (1998): On the use of meteorological observations in SAR interferometry. – Proc. IGARSS 1998, Seattle.
- SCHÄFER, M., WALTER, D., BUSCH, W. (2007): DInSAR Ground Movement Monitoring in the Rural Environment of an Open Pit Mining Area. – Proc. ENVISAT Symp., ESA SP-636, Montreux.