

## **Einsatz der differentiellen Radarinterferometrie zur Erfassung von Bodenbewegungen im Bereich einer Erdöllagerstätte im westlichen Emsland**

**Tanja Schäfer<sup>1)</sup>, Michael Schäfer<sup>1)</sup>, Wolfgang Busch<sup>1)</sup>,  
Hans-Joachim Dietzel<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal

<sup>2)</sup> Gaz de France Produktion Exploration GmbH

### **ZUSAMMENFASSUNG :**

*Die differentielle Radarinterferometrie ist ein modernes Fernerkundungsverfahren zur Detektion von Höhenänderungen der Erdoberfläche. Unter Verwendung von Radardaten des europäischen Satelliten ENVISAT sollen im Bereich einer Erdöllagerstätte Bodenbewegungen erfasst werden, die mit einer Änderung der Druckverhältnisse bei der Sekundärförderung einhergehen.*

*In dem für die Anwendung der Radarinterferometrie anspruchsvollen Untersuchungsgebiet wurden insgesamt zehn künstliche Radarreflektoren (Corner Reflektoren) aufgebaut. Diese ermöglichen, neben der radarinterferometrischen Erfassung von Höhenänderungen an eindeutig identifizierbaren Punkten, die Erhebung nivellitische Vergleichsmessungen, um die Genauigkeit des Verfahrens bewerten zu können. Um zudem die Sensitivität des Verfahrens zu ermitteln, wurde die Höhe einiger Reflektoren um einen festen Betrag geändert. Erste Ergebnisse zeigen, dass das hier vorgestellte Verfahren in Verbindung mit Corner Reflektoren es erlaubt, Höhenänderungen in der Größenordnung von wenigen Millimetern zu detektieren.*

### **ABSTRACT:**

*Differential radar interferometry is a modern remote sensing technique for the detection of height changes of the earth's surface. Using radar data of the European satellite ENVISAT, height changes in the area of an oil field shall be detected, which are induced by pressure changes within the reservoir in the secondary phase of oil production.*

*Due to some restrictions of the method in the investigation area, a network of ten radar corner reflectors (CR) has been installed. With these CR the possibility to measure both radar interferometric height changes and reference data by precise levelling is given. To investigate the sensitivity of the method, a manual height change of six CR has been conducted. First results prove the capability of satellite based radar interferometry to measure height changes at corner reflectors in the range of few millimetres.*

## 1 Motivation

An der Tagesoberfläche von Erdöllagerstätten kann es, insbesondere bei der Durchführung sekundärer Fördermaßnahmen und den dadurch hervorgerufenen Druckänderungen in der Lagerstätte, zu Vertikalbewegungen kommen. Im Untersuchungsgebiet, einer Erdöllagerstätte im westlichen Emsland, werden solche Vertikalbewegungen in geringem Ausmaß durch die Umkehr der Wasserinjektionsrichtung bei der Sekundärförderung erwartet.

Die Bewegungen der Tagesoberfläche können, abhängig von den Lagerstättencharakteristika, zeitlich verzögert und räumlich unterschiedlich stark auftreten. Die differentielle Radarinterferometrie besitzt das Potential für eine regelmäßige, in kurzen Zeitabständen und unter günstigen Umständen auch flächenhafte Erhebung von Höhenänderungsdaten. Somit besteht ein hohes Interesse daran, diese Methode im Untersuchungsgebiet für die Erfassung von Bodenbewegungen zu erproben. Ein übergeordnetes Ziel für die Anwendung der differentiellen Radarinterferometrie im Bereich von Erdöl-/Erdgaslagerstätten ist es, möglicherweise über die detektierten Höhenänderungen indirekt auf die Veränderungen der Druckverhältnisse im Untergrund zu schließen.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchungen ist die Anwendung der differentiellen Radarinterferometrie in einem vorwiegend landwirtschaftlich genutzten und von Vegetation bedecktem Gebiet, welches aufgrund der sich zeitlich stark ändernden Rückstreuungseigenschaften für die Radarstrahlung, eine flächenhafte Auswertbarkeit für die meisten Zeitspannen unmöglich macht. Aus diesem Grund soll hier der Einsatz und die Auswertbarkeit des Signals künstlicher Radarreflektoren, sog. Corner Reflektoren, zur Erfassung der Höhenänderungen an eindeutig identifizierbaren Punkten getestet werden und damit eine Möglichkeit geschaffen werden, auch in Gebieten mit starker zeitlicher Dekorrelation an ausgewählten Stellen Informationen zu erhalten. In diesem Rahmen wurde auch das Experiment einer manuellen Anhebung der Radarreflektoren um einen bekannten Betrag durchgeführt.

## 2 Anwendung der differentiellen Radarinterferometrie (DInSAR)

Die Datengrundlage bilden Aufnahmen des Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) Sensors an Bord des europäischen Satelliten ENVISAT. Dieser Sensor arbeitet im C-Band mit einer Wellenlänge von 56 Millimetern bei einer zeitlichen Wiederholrate von 35 Tagen für das gleiche Gebiet. Der mit einem Einfallswinkel von ca.  $20^\circ$  auf das Untersuchungsgebiet blickende ASAR-Sensor sendet dabei Radarstrahlung der genannten Wellenlänge aus und ermittelt die Intensität und den Phasenwert des von der Erdoberfläche zurück gestreuten Signals. Dabei wird eine Bodenauflösung von ca. 20 Metern erreicht.

Das Prinzip der differentiellen Radarinterferometrie mit SAR-Daten (DInSAR) beruht auf der Verrechnung zweier Satellitenszenen zu einem Interferogramm, welches die Phasendifferenz ( $\varphi_{\text{InSAR}}$ ) zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten darstellt (siehe Gleichung 1). In diesem Interferogramm sind allerdings noch Phasenanteile ( $\varphi_{\text{Orbit}}$  und  $\varphi_{\text{Topo}}$ ) enthalten, die durch die leicht verschiedene Orbitposition des Satelliten zu den zwei Aufnahmezeitpunkten bedingt sind. Werden diese Phasenanteile unter Berücksichtigung der Orbitdaten und der Topographie herausgerechnet, so erhält man das differentielle Interferogramm. Darin ist der Phasenanteil der zu detektierenden Bodenbewegungen ( $\varphi_{\text{Defo}}$ ) enthalten und außerdem unerwünschte atmosphärisch bedingte Phasenanteile ( $\varphi_{\text{Atmo}}$ ) und ein Phasenrauschen ( $\varphi_{\text{Rauschen}}$ ).

$$\Phi_{\text{InSAR}} = \Phi_{\text{Orbit}} + \Phi_{\text{Topo}} + \underbrace{\Phi_{\text{Defo}} + \Phi_{\text{Atmo}} + \Phi_{\text{Rauschen}}}_{\Phi_{\text{DInSAR}}} \quad (1)$$

Der atmosphärisch bedingte Phasenanteil entsteht vorwiegend durch lokale Unterschiede im Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre, die mit einer Veränderung der Dichte des Mediums einhergehen. Abhängig davon kommt es zu einer unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen. Im Interferogramm entstehen durch die Differenz des unterschiedlichen Zustands der Atmosphäre zu den beiden Aufnahmezeitpunkten Phasenverschiebungen, die unter Umständen nicht von solchen durch Bodenbewegungen verursachte unterschieden werden können. Für weitere Informationen zu atmosphärischen Einflüssen auf differentielle Interferogramme siehe HANSEN et al. (1998), SCHÄFER et al. (2007a), sowie KNOSPE (2008).

Eine wichtige Voraussetzung für die Auswertbarkeit eines Interferogramms zur Erfassung von Bodenbewegungen ist die Existenz einer festen Phasenbeziehung zwischen den beiden Szenen. Diese kann jedoch durch eine zeitliche Änderung der Rückstreuungseigenschaften, z.B. durch Vegetation, im Untersuchungsgebiet (zeitliche Dekorrelation) zerstört werden. Auch eine stark abweichende Aufnahmegeometrie von einem Satellitenüberflug zum Nächsten, aufgrund unterschiedlicher Positionen des Satelliten, äußert sich in einer Verminderung der Phasenbeziehung und führt damit zu einer geometrisch bedingten Dekorrelation. Die unterschiedliche Position des Satelliten zu zwei Aufnahmezeitpunkten wird durch die Länge der so genannten senkrechten Basislinie beschrieben.

Anhand der interferometrischen Phasendifferenz lassen sich Bewegungen der Erdoberfläche zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten mit einer Auflösung im Bereich von Bruchteilen der verwendeten Radarwellenlänge ermitteln. Aufgrund der von dem Sensor ASAR verwendeten Wellenlänge von 56 Millimetern ergibt sich eine theoretische Auflösung von weniger als einem Millimeter. Die Qualität und Genauigkeit der Erfassung von Bodenbewegungen mit differentieller Radarinterferometrie hängt jedoch wesentlich vom Einfluss unerwünschter Phasenanteile und deren Korrektur, sowie von Dekorrelationseffekten ab, so dass letztendlich nur Bodenbewegungen von mehreren Millimetern sicher bestimmt werden können (siehe hierzu auch KNOSPE, 2007 und SCHÄFER et al., 2007b).

Daher wurde bei diesem Projekt berücksichtigt, dass Aufnahmezeitpunkte mit einem offensichtlichen Anteil kleinräumiger Inhomogenitäten des atmosphärisch bedingten Phasenanteils nicht zur Auswertung mit herangezogen wurden. Desweiteren wurde darauf geachtet, Interferogramm-Kombinationen mit einer möglichst kleinen senkrechten Basislinie für die Auswertung der Höhenänderungen zu verwenden, da mit ansteigender geometrischer Dekorrelation die visuelle Begutachtung eines Interferogramms nach atmosphärischen und anderen unerwünschten Phasenanteilen erschwert wird. Auch Fehler bei der Entfernung des topographischen Phasenanteils, verursacht durch Ungenauigkeiten im verwendeten Höhenmodell, nehmen in Interferogrammen mit größer werdender senkrechter Basislinie zu.

### 3 Corner Reflektoren

#### 3.1 Einsatz im Untersuchungsgebiet

Im Untersuchungsgebiet wurden insgesamt zehn Corner Reflektoren aufgebaut und auf die Überflughbahn des Satelliten ENVISAT ausgerichtet. Diese künstlichen Radarreflektoren weisen durch ihre Bauweise ein charakteristisches und langzeitstabiles Rückstreuverhalten für die vom Satelliten ausgesendete Radarstrahlung auf. An diesen Punkten können die Höhenänderungen anhand der radarinterferometrischen Auswertungen besonders gut ermittelt werden.

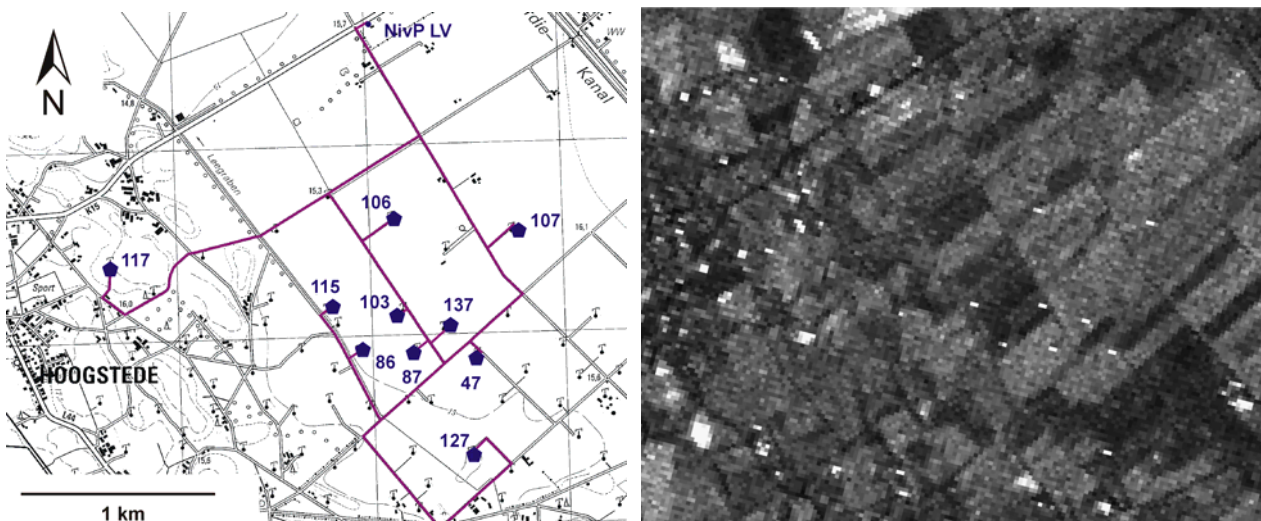


Abb.1 : Lage der Corner Reflektoren und des Nivellement-Netzes in einer topographischen Karte (links) und Corner Reflektoren als helle Rückstreuer im Radar-Intensitätsbild (rechts, gleicher Ausschnitt)



Abb.2 : Corner Reflektor (links im Bild) neben einer Erdölförderanlage

Die Corner Reflektoren stellen im Gelände und im Radar-Intensitätsbild (siehe Abb. 1) eindeutig identifizierbare Punkte dar, an denen auch Referenzdaten mithilfe von GPS- oder Nivellementmessungen erhoben werden können. So wurden die zehn Corner Reflektoren per Nivellement an einen Höhenfestpunkt der niedersächsischen Landesvermessung im Norden des Untersuchungsgebiets angeschlossen (siehe NivP LV in Abb.1).

Die Errichtung der Reflektoren konnte nur auf den Grundstücken des Projektpartners erfolgen, und damit in unmittelbarer Nähe (ca. zehn Meter) zu den Erdölförderanlagen (Abb. 2). Wegen des ehemaligen, mittlerweile entwässerten Moorbodens im Bereich des Untersuchungsgebietes, wurden die Corner Reflektoren auf Gewinderohren befestigt, die sechs Meter tief in den Untergrund reichen.

### 3.2 Bauweise

Die Corner Reflektoren bestehen aus drei senkrecht aufeinander stehenden Metallflächen, an denen die einfallende Strahlung dreimal reflektiert und anschließend genau zu ihrem Ursprungsort, zurückgeworfen wird. Dabei legen alle Wellen innerhalb des Reflektors die gleiche Weglänge zurück, unabhängig davon, wo der jeweilige Strahl in den Reflektor eingetreten ist.

Die eigentlichen Reflektorflächen wurden aus zwei Millimeter starken Lochblechen aus Aluminium hergestellt. Die Reflektorflächen weisen eine optimierte fünfeckige (pentagonale) Flächengeometrie nach SARABANDI & CHIU (1996) auf (siehe Abb. 3). Diese Konstruktion erlaubt die Herstellung von 33 % kleineren Reflektoren im Gegensatz zu herkömmlichen trigonalen Corner Reflektoren mit dreieckigen Seitenflächen bei gleicher Rückstreuintensität (Radar Cross Section, RCS). Gleichzeitig verringern sich durch die Flächengeometrie auch das Gewicht und die Windanfälligkeit der Reflektoren erheblich, die zusätzlich durch die Verwendung von Lochblech verringert wird. Durch die pentagonale Bauweise werden zudem unerwünschte Reflektionen mit Objekten außerhalb des Reflektors (z.B. mit der vor dem Reflektor befindlichen Erdoberfläche) vermieden, die bei einem trigonalen Reflektor wegen der in den Ecken nur zweifach stattfindenden Reflektion auftreten.

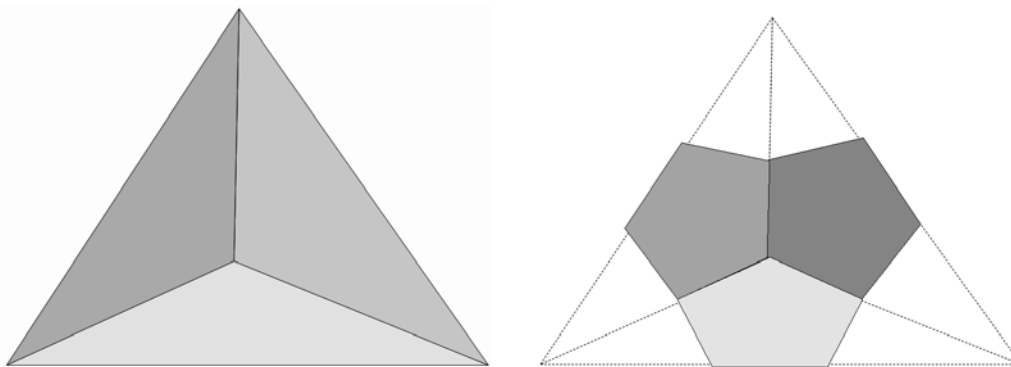


Abb.3 : Größenvergleich zwischen einem trigonalen (links) und pentagonalen Corner Reflektor (rechts) mit identischer Rückstreuintensität

Die Flächen sind auf einer Befestigungsvorrichtung aus Aluminium montiert, die in ein ausgedrehtes Gewinderohr eingesetzt wird. Durch diese sind die Reflektoren in zwei Achsen frei beweglich. Eine durch ein Vorhängeschloss gesicherte Abdeckung verhindert ein unbefugtes Verstellen des Reflektors.

Entwicklung und Bau der Corner Reflektoren fanden am IGMC der TU Clausthal statt, das Setzen der Rohre im Untersuchungsgebiet wurde vom Projektpartner durchgeführt.

## **4 Aktueller Stand der Auswertungen**

### **4.1 Vorgehensweise**

Wie erwartet, ist aufgrund der vegetationsbedingten zeitlichen Dekorrelation im landwirtschaftlich geprägten westlichen Emsland, eine flächenhafte Detektion von Bodenbewegungen aus den Phasenwerten der Interferogramme zu den meisten Aufnahmezeitpunkten nicht möglich. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung ausschließlich für die errichteten Corner Reflektoren.

Die Prozessierung der Radardaten zu differentiellen Interferogrammen erfolgt mit der „GAMMA SAR and Interferometry Software“ der Firma Gamma Remote Sensing and Consulting AG, Schweiz. Die SAR-Daten werden ausgehend von Rohdaten zu so genannten „Single Look Complex“ (SLC) Daten prozessiert. Anschließend erfolgt eine präzise Koregistrierung aller Szenen auf die Geometrie einer Referenzszenen. Mit diesen koregistrierten SLC-Szenen können Interferogramme berechnet werden.

Die Auswertung erfolgt anhand von Skripten für die Gamma-Software, die am IGMC geschrieben wurden, um das Auslesen der Phasenwerte der Corner Reflektoren in allen Interferogramm-Kombinationen zu vereinfachen. Dabei wird zunächst die Position des Maximums der Rückstreuung eines jeden Corner Reflektors mit Subpixelgenauigkeit bestimmt, um an dieser Stelle den Phasenwert im Interferogramm zu interpolieren. Die Verrechnung von mehreren möglichst idealen Interferogrammen (siehe Kap. 2) ermöglicht es, nachdem die Phasenwerte in Zentimeter umgerechnet wurden, für jeden Zeitpunkt eine Höhenänderung bezogen auf einen Referenzzeitpunkt (siehe Zeitpunkt 0 Tage in Abb. 4) anzugeben.

Desweiteren werden die Phasenwerte der CR um den atmosphärischen Phasenanteil (siehe Kap. 2) korrigiert. Die Verteilung des atmosphärischen Phasenanteils in den differentiellen Interferogrammen wird in dem kleinräumigen Untersuchungsgebiet von ca. 1,3 x 2,1 Kilometer als homogen angesehen. Der westlich, außerhalb des Bereichs der erwarteten Bodenbewegungen gelegene CR (siehe Punkt 117 in Abb. 1) dient als lokaler Referenzwert für die Korrektur und wird von den Phasenwerten der restlichen neun CR abgezogen. Bei drei der 17 Zeitpunkte waren die atmosphärischen Inhomogenitäten jedoch so kleinräumig (z.B. durch Cumuluswolken), dass keine erfolgreiche Korrektur durchgeführt werden konnte und die Szenen aus der Auswertung herausgelassen werden mussten. Zu den anderen Zeitpunkten konnte aufgrund der räumlichen Dichte der CR die Korrektur erfolgreich durchgeführt werden. Dennoch sind gewisse atmosphärische Restfehler nicht auszuschließen, die zu einer größeren Streuung der Messwerte führen können.

### **4.2 Ergebnisse**

Seit Projektbeginn wurde das Untersuchungsgebiet im regelmäßigen, zeitlichen Abstand von 35 Tagen mit insgesamt 17 ENVISAT-Szenen beobachtet. Drei Szenen (die Zeitpunkte -280, -245 und +35 Tage) wurden jedoch aus den oben erwähnten Gründen von der Auswertung ausgeschlossen. In Abb. 4 sind die aus den differentiellen Interferogrammen ermittelten Höhenänderungen für neun der zehn aufgestellten Corner Reflektoren (CR) dargestellt. Der Referenzzeitpunkt 0 Tage im Zeit-Höhenänderungs-Diagramm, stellt die Referenzszenen dar, auf welche die Höhenänderungen bezogen werden. Die Aufnahme dieser Szenen erfolgte einen Tag vor der Umkehrung der Wasserinjektionsmaßnahmen.

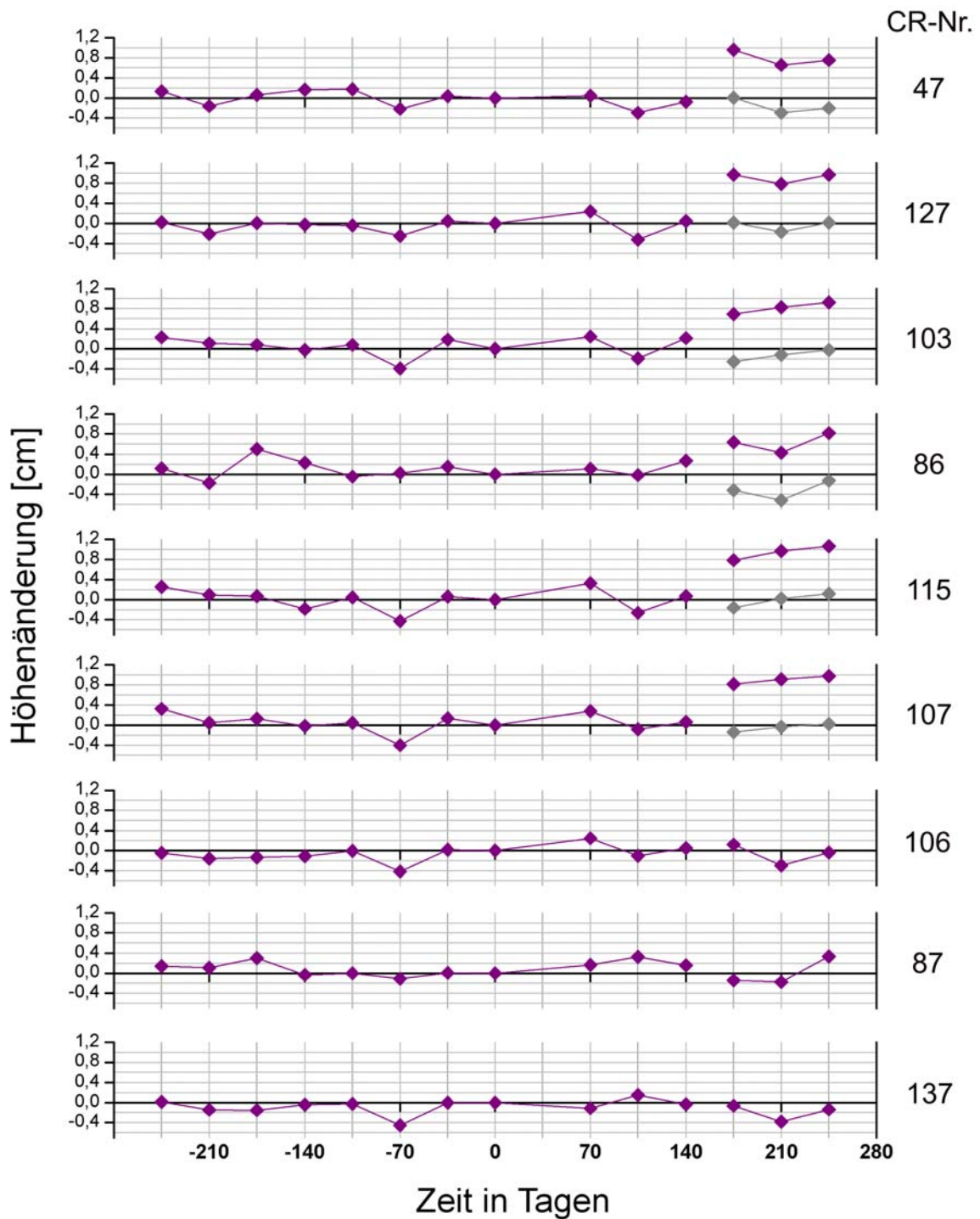


Abb.4 : Zeit-Höhenänderungsdiagramme der neun CR, die sechs zu oberst dargestellten CR wurden ab dem Zeitpunkt 175 um 9,5 mm angehoben (Rückrechnung der Anhebung in hellgrau dargestellt)

Vor dem Zeitpunkt 0 Tage wurden erwartungsgemäß keine Höhenänderungen an den neun Corner Reflektoren festgestellt. Somit können für diesen Zeitraum statistische Genauigkeitsabschätzungen des Messverfahrens vorgenommen werden. Für die insgesamt 63 Messwerte der 9 CR zu 7 Zeitpunkten liegt der arithmetische Mittelwert bei 0 Millimetern mit einer Standardabweichung von unter 2 Millimetern. Eine signifikante Höhenänderung kann somit ab ca. 6 Millimetern mit diesem Verfahren ermittelt werden.



Wie in Kap. 1 erwähnt wurde das Experiment einer manuellen Anhebung von 6 CR (CR 47, 127, 103, 86, 115, und 107) durch Einbau einer 9,5 Millimeter dicken Distanzscheibe durchgeführt. Diese Anhebung fand kurz vor Aufnahme der Szene zum Zeitpunkt 175 Tage statt und wurde seitdem beibehalten. Die ermittelte Höhenänderung dieser 6 CR für 3 Zeitpunkte liegt bei einem arithmetischen Mittelwert von 8,3 Millimetern mit einer Standardabweichung von 1,6 Millimetern. Die zu beobachtende geringe Unterschätzung des eingestellten Wertes um circa einen Millimeter liegt möglicherweise darin begründet, dass noch zu wenige unabhängige Messungen vorliegen. Zudem könnten leichte atmosphärische Fehlereinflüsse, die wegen ihrer Inhomogenität nicht völlig durch den Bezug auf den Referenzpunkt beseitigt werden konnten, zu der Abweichung geführt haben.

Bisher konnte seit dem Referenzzeitpunkt 0 Tage für keinen der neun CR eine signifikante Höhenänderung festgestellt werden. Zur Verdeutlichung wurden in Abb. 4 auch die um den Anhebungsbetrag zurückgerechneten Werte (als hellgraue Punkte) dargestellt.

### 4.3 Vergleich mit Referenzdaten

Die Referenzdaten wurden mithilfe zweier Präzisionsnivellements erhoben, bei denen die zehn Corner Reflektoren in einem Nivellement-Netz an einen Höhenfestpunkt der niedersächsischen Landesvermessung angeschlossen wurden (siehe Abb. 1, Kap. 3). Das erste Nivellement fand zu Beginn des Projektes im Juli 2006 statt, das zweite fast 12 Monate später im Juni 2007. Das zweite Nivellement wurde kurz vor der Einleitung der Druckänderungen in der Lagerstätte (siehe Zeitpunkt 0 Tage in Abb. 4) durchgeführt, um zum einen natürliche oder lagerstättenbedingte Ursachen für Bodenbewegungen im Vorfeld des Versuchs ausschließen zu können und um eine Referenzmessung zu erhalten, die dicht am Zeitpunkt der Druckänderung liegt.

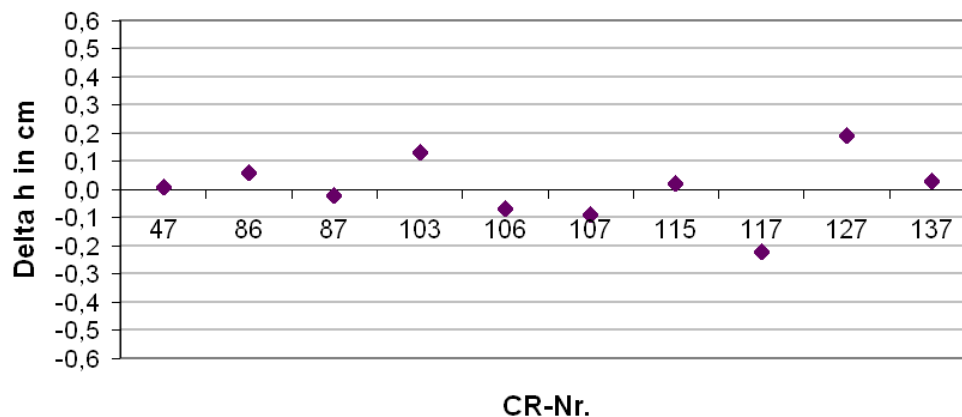


Abb.5 : Höhendifferenz der beiden Nivellements zwischen 2006 und 2007

Der Vergleich beider Nivellements ergibt, wie auch die radarinterferometrisch ermittelten Ergebnisse, keine signifikanten Höhenänderungen in diesem Zeitraum. Es ist beabsichtigt, im April 2008 eine erneute Nivellementmessung durchzuführen, um die bis zu diesem Zeitpunkt mit der Radarinterferometrie gewonnenen Ergebnisse zu validieren.



## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Während der bisherigen Projektlaufzeit konnten noch keine lagerstättenbedingten Bodenbewegungen im Bereich des Untersuchungsgebietes nachgewiesen werden. Da angenommen wird, dass prognostizierte Höhenänderungen möglicherweise erst mit einem unbekanntem zeitlichen Versatz eintreten, wird die Datenaufzeichnung und -auswertung in 2008 vorerst weitergeführt. Mitte April 2008 wird zeitgleich mit einem Überflug von ENVISAT ein drittes Nivellement durchgeführt werden, welches die radarinterferometrischen Messergebnisse belegen soll.

Die bisherigen Ergebnisse des Projektes zeigen, dass durch den gezielten Einsatz künstlicher Radarreflektoren, eine Erfassung von Bodenbewegungen in der Größenordnung mehrerer Millimeter, auch in für die Radarinterferometrie nahezu ungeeigneten Gebieten mit hoher zeitlicher Dekorrelation, möglich ist. Ein zeitlich lückenloses Monitoring bereitet jedoch, wegen der auch kleinräumig inhomogen auftretenden atmosphärisch bedingten Phasenverschiebungen, noch Probleme. Durch dieses Phänomen wird leider auch die potentielle Genauigkeit des Verfahrens herabgesetzt.

Hinsichtlich einer Verbesserung der Auswertungen bezüglich dieser Probleme wird gerade untersucht, wie sich die Verwendung mehrerer Referenzpunkte auswirkt, mit denen durch Interpolation ein individueller Korrekturwert für jeden Corner Reflektor errechnet werden kann. Diese Vorgehensweise wurde bereits exemplarisch verfolgt, ist jedoch noch mit viel Zeitaufwand verbunden. Daher ist eine Automatisierung dieser Auswertung angedacht. Zudem sollen mehr Rückstreuer in der unmittelbaren Umgebung der Corner Reflektoren berücksichtigt werden, um zusätzliche Referenzpunkte für eine bessere Bestimmung der atmosphärischen Einflüsse zu erhalten. Ein weiteres Ziel ist die Ermittlung des Einflusses von Ungenauigkeiten des verwendeten digitalen Höhenmodells, die zu systematischen Fehlern in den Ergebnissen führen könnten.

## Literatur

HANSEN, R. F., ZEBKER, H., KLEES, R., BARLAG, S. (1998): On the Use of Meteorological Observations in SAR Interferometry, IGARSS, Seattle.

KNOSPE, S. (2007): Qualitätsaspekte von Bodenbewegungsmessungen mit Differentieller SAR Interferometrie, 7. Altbergbaukolloquium, Freiberg.

KNOSPE, S. (2008): Autokorrelation und Anisotropie des Atmosphäreneinflusses in dInSAR Bodenbewegungsmessungen, 9. Geokinematischer Tag, Freiberg.

SARABANDI, K. & CHIU, T. C. (1996): Optimum Corner Reflectors Design, IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, Michigan.

SCHÄFER, M., BUSCH, W., WALTER, D., FISCHER, C., LOHSTRÄTER, O. (2007a): Radarinterferometrische Erfassung von Höhenänderungen im Bereich aktiver Braunkohletagebaue im Südraum Leipzig, Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen, Heft 22, S. 394 – 407.

SCHÄFER, M., WALTER, D., BUSCH, W. (2007b): DInSAR Ground Movement Monitoring in the rural Environment of an Open Pit Mining Area, ENVISAT Symposium (ESA SP-636), Montreux, Switzerland.