

**Dipl.-Ing. V. Spreckels, Dipl.-Ing. J. Musiedlak,
Dr. U. Wegmüller, Dr. T. Strozzi,
Dipl.-Ing. H.-C. Wichlacz**

**Nutzung von InSAR-Daten zur
großflächigen Erfassung von
topographischen Veränderungen über
Abbaubereichen der
Deutschen Steinkohle AG (DSK AG)**

Nutzung von InSAR-Daten zur großflächigen Erfassung von topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK)

Volker Spreckels, Dipl.-Ing.
Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover
Nienburger Straße 1, D-30167 Hannover
Tel.: 02361-308-458, Fax: 02361-308-411
e-mail: spreckels@ipi.uni-hannover.de

Dr. Urs Wegmüller, Dr. Tazio Strozzi
Gamma Remote Sensing AG
Thunstraße 130, CH-3074 Muri BE, Schweiz
Tel.: 0041-31-9517005, Fax: 0041-31-9517008
e-mail: wegmuller@gamma-rs.ch

Jork Musiedlak, Dipl.-Ing.
Deutsche Steinkohle AG (DSK)
Dienstleistungsbereich Ingenieurvermessung/Geoinformation (DIG)
Karlstraße 37-39, D-45661 Recklinghausen
Tel.: 02361-308-460, Fax: 02361-308-411
e-mail: Jork.Musiedlak@deutsche-steinkohle.de

Hans-Christian Wichlacz, Dipl.-Ing.
Deutsche Steinkohle AG (DSK) - TM 1 Lagerstättenplanung
Shamrockring 1, D-44623 Herne
Tel.: 02323-15-3809
e-mail: Hans-Christian.Wichlacz@deutsche-steinkohle.de

1. Einleitung

Die *Deutsche Steinkohle AG* (DSK) ist verpflichtet, die Auswirkungen des untertägigen Abbaus an der Tagesoberfläche zu überwachen und zu analysieren [1]. Alle relevanten Informationen werden nach einheitlichen Kriterien in einem Geo-Informationssystem (GIS) geführt und in einer zentralen Datenbank (GDZB) vorgehalten. Zur Erfassung der raumbezogenen und thematischen Informationen werden je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Insbesondere sind die Photogrammetrie und Fernerkundung als geeignet zur schnellen und wirtschaftlichen Datenerfassung großer Flächen im Rahmen dieser Überwachungsaufgaben zu nennen [2].

In diesem Beitrag werden die Auswertungen und erste Ergebnisse eines FuE-Projektes der DSK und des *Instituts für Photogrammetrie und GeoInformation* (IPI) der Universität Hannover zum Potential und den Grenzen von differentiellen interferometrischen Radar-Daten (dInSAR) der ERS-Satelliten zur Erfassung von Bodenbewegungen, sowie eines Flugzeug-Radarsystems zur Ableitung von digitalen Höhenmodellen über interferometrisches SAR (InSAR) zum großflächigen Bodenbewegungsmonitoring für städtische und ländliche Bereiche im Ruhrgebiet vorgestellt.

Die Unterscheidung von InSAR und dInSAR besteht darin, daß beim flugzeuggetragenen Radarsystem eine Sende- und zwei Empfangsantennen zur Ableitung eines digitalen Geländemodells (DGM) verwendet werden (InSAR). Bei den dInSAR-Verfahren der Satellitenauswertungen wird jedoch aus zwei unabhängigen Aufnahmen eine Trennung der Komponenten *Geländephase* und *Verschiebungsphase* (s. Kapitel 2) durchgeführt. Die Bearbeitung und Auswertung der ERS-Radar-Daten wurde von der Firma *Gamma Remote Sensing* (GAMMA) durchgeführt, die Radarbefliegung erfolgte mit dem Radarsystem *AeS-1* der Firma *AEROSENSING*.

Das Interesse an der differentiellen SAR Interferometrie wurde geweckt, als GAMMA mit der DSK als Co-Investigator im Rahmen des „Data User Programme: Differential Interferometric Applications in Urban Areas“ der European Space Agency (ESA) dInSAR-Auswertungen durchführte [3].

Die Radar-Daten der ERS-Satelliten sind größtenteils wetterunabhängig und zeichnen Gebiete aus einer annähernd gleichen Orbit-Position, mit einer Wiederkehrrate von 35 Tagen, wiederholt auf. Eine Szene umfaßt einen Bereich von etwa 100 km x 100 km mit einer Bodenauflösung von 25 Metern. Im Verbund mit den bei DSK geführten terrestrischen Meßdaten (Nivellements, EDM- und GPS-Messungen), sowie den GIS-Datenbeständen über Abbaubereiche und Bodenbewegungen erfolgt eine gegenseitige Bewertung und Stützung der jeweiligen Datensätze. Aktuelle Informationen über den fortschreitenden Abbau, wie z.B. die Lageänderung des Einwirkungsbereiches (sog. Wanderung des Nullrandes) werden zeitnah dokumentiert. Die Auswertungen mit dem dInSAR-Verfahren aus ERS-Daten werden für die Gebiete mit unterschiedlicher Abbausituation, geologischen Verhältnissen und Topographie (Stadt/Land) der Städte Gelsenkirchen und Dorsten (1995 bis 1997) sowie Recklinghausen (2000) durchgeführt. Für das Gebiet von Recklinghausen ist weiterhin vorgesehen, 3-D-Bewegungen aus Ascending- und Descending Orbit-Daten (s. Kapitel 2) abzuleiten. Hierbei stammen zwei Richtungskomponenten aus den Ascending und Descending-Daten, die dritte Komponente wird mit einer Modellannahme festgelegt, z.B. in Richtung des Abbauschwerpunktes.

Mit dem Flugzeugradarsystem AeS-1 wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Befliegung über ca. 90 km² für das Gebiet Recklinghausen-Haltern durchgeführt, um digitale Geländemodelle (DGM) aus zwei unterschiedlichen Wellenlängen (X-Band_[cm] und P-Band_[dm]) abzuleiten. Die Datensätze werden derzeit prozessiert. Geplant ist, die X-Band Daten zur hochgenauen Ableitung eines DGM in vegetationsfreien Gebieten zu nutzen, die P-Band Daten versprechen zur Zeit die Ableitung von Höhenmodellen der Erdoberfläche in Waldgebieten mit einer Höhengenaugkeit von ±1 Meter. Durch Verwendung von sogenannten Corner-Reflektoren auf eingemessenen Punkten können die Radar-DGM mit größtmöglicher Genauigkeit georeferenziert werden.

Der Vorteil der flugzeuggetragenen Radar-DGM liegt in der Wirtschaftlichkeit bei Aufnahmen von Gebieten ab einer Größe von 500 km². Diese Radar-Höhenmodelle könnten als ein reines digitales Höhenraster (DGM 1. Stufe) im Rahmen der Umweltverträglichkeitsstudien (UVS) dienen. Diese DGM sind allerdings nicht dazu geeignet, um linienhafte Objekte wie Bruchkanten oder Bachachsen zu extrahieren (DGM 2. Stufe) und können deshalb die hochgenauen, mit photogrammetrischen und terrestrischen Methoden erstellten, DGM 1. Stufe nicht ersetzen.

Weitere Einsatzgebiete für die flächendeckenden Flugzeugradar-DGM ist die Verwendung als Grundlage zur Bewertung der inselhaft bei DSK vorliegenden DGM von Halden, UVS-Gebieten oder Werksgeländen und als stützendes Referenzhöhenmodell für satellitengetragene dInSAR Auswertungen zur großflächigen Erfassung von Bodenbewegungen.

In Verbindung mit einem GIS ermöglicht das vorgestellte Verfahren, einheitlich für große Flächen, eine aktuelle, unabhängige und wirtschaftliche Unterstützung der vorhandenen Datenebenen.

2. Das Verfahren der differentiellen SAR Interferometrie

In den letzten Jahren hat die Nutzung von Daten abbildender Radarsysteme im Bereich der Fernerkundung enorm an Bedeutung gewonnen. Nach dem Start der europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 im Jahre 1991 und ERS-2 im Jahre 1995 sind von deren seitlich gerichteten SAR Systemen kontinuierlich Bilder der Erdoberfläche von hoher Qualität aufgenommen worden, so daß ein umfangreiches Datenarchiv besteht. Ursprünglich wurde der ERS-1 zum Einsatz für geowissenschaftliche Zwecke geplant, wie der Glaziologie, Ozeanographie, zu geologischen und geographischen Kartierungen und zum Monitoring von Meereis in den Polarregionen. Da diese Regionen langfristig im Schatten liegen (Polarnacht) und zudem einen hohen Wolkenbedeckungsgrad aufweisen, eignen sich für diese Einsatzbereiche vor allem aktive Mikrowellensensoren.

Tabelle 1: Systemparameter des ERS-1 Satelliten.

Parameter	Wert für ERS-1
Wellenlänge λ	5.6 cm
Trägerfrequenz f_0	5.3 GHz
Flughöhe	785 km
Mittlere Schrägentfernung r	845 km
Mittlerer Blickwinkel q	23°
Mittlerer Einfallswinkel	26°
Abtastrate in Range	9.4 m
Abtastrate in Azimut	5 m
Bodenauflösung im Bilddatensatz	25 m
Kritische Basislinie für InSAR	1100 m

Mit Hilfe der SAR Interferometrie (InSAR) ist es zwar möglich, Höhenmodelle der Erde zu erstellen, allerdings ist die Höhengenaugkeit von bestenfalls ± 2 Meter in Steppenbereichen und etwa ± 10 Meter bis ± 25 Meter bei mitteleuropäischem Bodenrelief nur für globale Betrachtungen gegeben [4].

Die Stärke der differentiellen SAR Interferometrie (dInSAR) ist es, ohne die Verwendung von zusätzlichen Informationen, kleine Höhenänderungen, also Hebungen, Senkungen und räumliche Verschiebungen des Geländes in der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge von 0 cm bis etwa ± 5.6 cm in den Satellitendaten zu detektieren [5].

Um diesen scheinbaren Widerspruch der schlechten absoluten Höhengenaugkeit und der sehr guten Erfassung kleiner Verschiebungen zu erklären, wird im Folgenden das Verfahren der elektronischen Entfernungsmessung der täglichen Vermessungspraxis zur Erklärung der dInSAR-Genauigkeiten herangezogen. Die allgemein verwendeten elektro-optischen Distanzmeßgeräte (EDM) arbeiten nach dem Phasenvergleichsverfahren [6]. Bei diesem Verfahren wird einer kontinuierlich ausgestrahlten (kurzwelligen) Trägerwelle ein langwelliges sinusförmiges Signal aufmoduliert. Die aufmodulierte Welle dient dann als Maßeinheit für die Streckenmessung. Eine fest vorgegebene Modulationsfrequenz f legt dabei nach der Beziehung

$$l = \frac{c}{f} \quad (1)$$

die Wellenlänge l fest, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Die Meßwelle wird vom Sender abgestrahlt und vom Zielreflektor zum Empfänger zurückreflektiert (s. Abb. 1). Dort trifft die über die doppelte Meßstrecke gelaufene Welle mit einer Phasenverschiebung gegenüber der ausgesandten Welle ein.

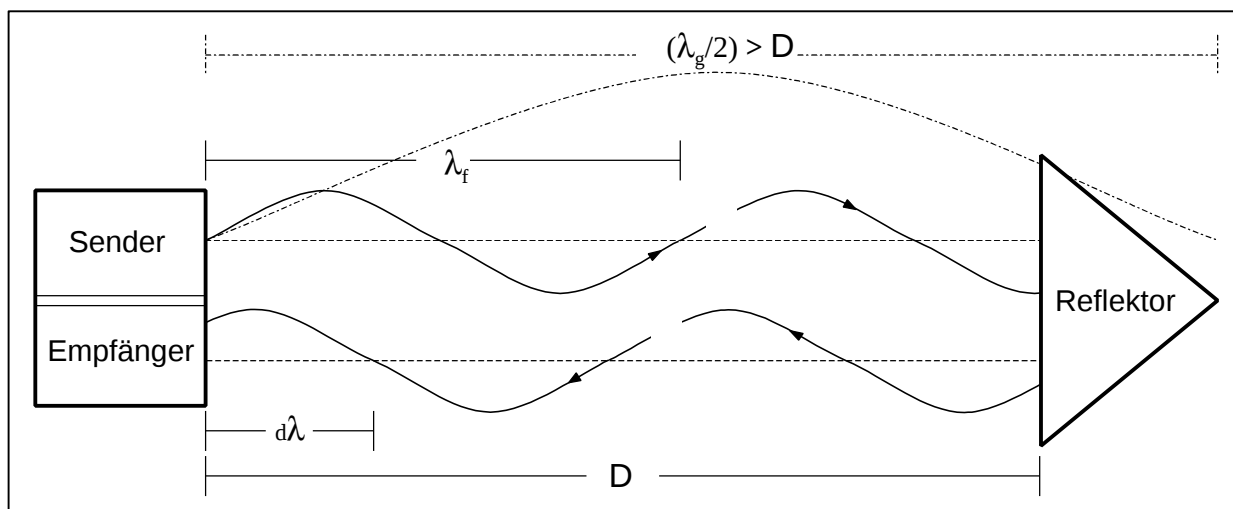


Abbildung 1: Phasenvergleichsverfahren der elektro-optischen Distanzmessung (EDM).

Die durchlaufene Strecke $2D$ setzt sich aus dem Vielfachen N der Modulationswellenlänge l und dem der Phasenverschiebung entsprechenden Wellenreststück dl zusammen:

$$2D = N \cdot l + dl \quad (2)$$

$$D = N \frac{l}{2} + \frac{dl}{2} \quad (3)$$

Das Wellenreststück dl kann mit *Phasendetektoren* gemessen werden, aber mit seiner Bestimmung ist das Ergebnis für die Streckenmessung noch nicht eindeutig, denn die Anzahl N der ganzen Wellenlängen ist bisher noch unbekannt. Ein eindeutiges Ergebnis liegt dann vor, wenn die Maßstabswellenlänge l größer als die zu messende doppelte Maximaldistanz ist (s. Abb. 1). Die so gemessene Phasenverschiebung dl , und damit das Wellenreststück dl , entspricht dann der gesuchten doppelten Strecke $2D$. Allerdings ist die Auflösung der Phasenmessung auf etwa 1/5000 bis 1/10000 der verwendeten Maßstabswellenlänge beschränkt, was z.B. bei $l = 10$ km nur eine Genauigkeit von 1 bis 2 Meter ermöglicht. Deshalb besteht die elektro-optische Entfernungsmessung aus einer Fein- und einer Grobmessung. Die Feinmessung mit einer kleinen Maßstabswellenlänge l_f ergibt mit hoher Auflösung das Wellenreststück dl_f . Der Grobwert dl_g aus der Messung mit der großen Maßstabswellenlänge l_g (mit $l_g > 2D$) wird nur dazu verwendet, die Anzahl N der ganzen Wellenlängen l_f zu bestimmen.

Da derartige Meßmethoden für Radarsatelliten nicht vorgesehen sind, ist die Verwendung einer groben Wellenlänge l_g für die dInSAR-Verfahren nicht gegeben. Es kann hier nur die Feinmessung mit der Wellenlänge von 5.6 cm durchgeführt werden, jedoch wird mit dem Verfahren des *Phase-Unwrapping* versucht, den Meßbereich für die Erfassung größerer Verschiebungen zu erweitern. Somit erklärt sich die Eignung satellitengetragener Radarsysteme zur hochgenauen Erfassung kleiner, relativer Bewegungen in der Größenordnung der verwendeten Wellenlänge. Hierbei werden zwei oder mehrere Aufnahmen der ERS-Satelliten miteinander verglichen. Es können ERS-1/-2-Tandem Paare vorhanden sein, wobei das Gebiet von beiden Satelliten innerhalb kurzer Zeit überflogen wurde. Es können auch Daten nur von einem Satelliten genutzt werden, wobei es *Ascending* und *Descending* Daten gibt, je nachdem ob der Satellit vom Nord- oder Südpol aus kommend das Gebiet überflog und es somit von zwei verschiedenen Blickrichtungen aus aufgenommen wurde.

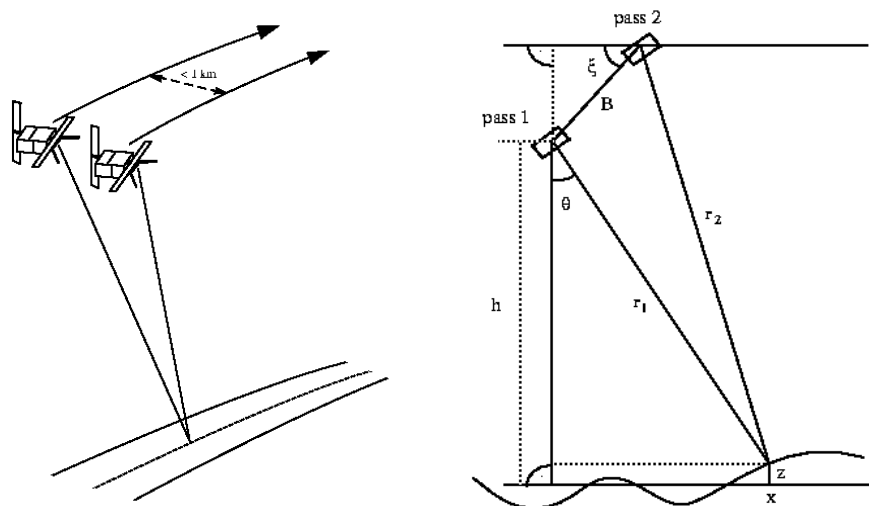


Abbildung 2: Die interferometrische Aufnahmegeometrie besteht aus den zwei Aufnahmepositionen mit den Beobachtungsvektoren r_1 und r_2 zum Bodenelement Z . Der Blickwinkel des Radars ist q . Die Basislinie B ist um den Winkel x relativ zur Horizontalen geneigt.

Bei den differentiellen InSAR Verfahren wird die Phaseninformation des SAR-Signals ausgewertet. Hierbei wird eine zweite ($\mathbf{P}_2$), räumlich von der ersten getrennte Satellitenposition ($\mathbf{P}_1$) benutzt, um die Mehrdeutigkeiten, also die Anzahl der ganzen Wellenlängen k von der jeweiligen Sensorposition zum Zielpunkt, aufzulösen und eine dreidimensionale Erfassung der Zielobjekte zu erreichen (s. Abb. 2).

Die Aufnahmegeometrie ist ähnlich derjenigen bekannter stereometrischer Verfahren [7], [8] und hat zur Folge, daß verschiedene Zielpunkte unterschiedliche Weglängendifferenzen zu den Sensorpositionen $\mathbf{P}_1$ und $\mathbf{P}_2$ besitzen. Bei der interferometrischen Datenverarbeitung wird nun nicht die Phaseeinzelmessung betrachtet, sondern die Differenz zweier Messungen. Unter gewissen Voraussetzungen besteht dann eine feste Phasenbeziehung zwischen beiden Signalen, d. h. sie sind *kohärent* [9]. Während bei stereoskopischen Auswertesystemen versucht wird, die Parallaxe durch direkte Messung der Weglängen zu bestimmen, wird nach [10] beim interferometrischen SAR die Kohärenz des Signals ausgenutzt und die Tatsache, daß sich die Phase f einer monochromatischen elektromagnetischen Welle der Länge l gemäß der Beziehung

$$f = -\frac{4p}{l}(|\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1|) \quad (4)$$

proportional zur zurückgelegten Weglänge r verhält. Eine Phasendifferenzmessung, wie sie in der SAR-Interferometrie durchgeführt wird, entspricht somit einer Bestimmung des Wegunterschiedes. Die Gesamtkohärenz g zweier SAR-Signale $\mathbf{s}_1$ und $\mathbf{s}_2$ mit den Signallaufwegen $\mathbf{r}_1$ und $\mathbf{r}_2$ zu den Positionen $\mathbf{P}_1$ und $\mathbf{P}_2$ wird als komplexer Korrelationskoeffizient ausgedrückt, mit der räumlichen Mittelung für die Kreuzprodukte $\langle x \rangle$:

$$g = \frac{\langle \mathbf{s}_2 \mathbf{s}_1^* \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{s}_1 \mathbf{s}_1^* \rangle \langle \mathbf{s}_2 \mathbf{s}_2^* \rangle}} \quad (5)$$

In dem komplexen Interferogramm ist die interferometrische Phase f auf einen Wertebereich von $-p \leq f \leq p$ beschränkt. Nur für sehr kleine Basislinien B oder sehr geringe Höhenunterschiede kann mit diesem Wertebereich die gesamte Höhendynamik der Erdoberfläche erfaßt werden. Für alle anderen Fälle ist die interferometrische Phase f insofern mehrdeutig, als gleiche Phasenwerte verschiedenen absoluten Phasenunterschieden entsprechen können, also an verschiedenen Orten auf $\mathbf{r}_1$ oder $\mathbf{r}_2$ liegen könnten. Im sogenannten *Phase-Unwrapping* Prozeß müssen diese Mehrdeutigkeiten aufgelöst und die absolute Phase f_{unw} bestimmt werden. Der *Phase-Unwrapping* Prozeß kann durch ein vorliegendes großflächiges digitales Geländemodell (DGM) unterstützt werden, was den Detektionsbereich zur eindeutigen Erfassung zusätzlicher Phasenzyklen (sog. *Fringes*) erweitert. Zeitliche Dekorrelationen durch zufällige zeitliche Veränderungen der Rückstrahlelemente (Streuer) am Erdboden führen zu einem Anstieg des Phasenrauschens, was die Genauigkeit der Bestimmung der interferometrischen Phase beeinträchtigt. Solche zufälligen zeitlichen Veränderungen sind etwa Bewegungen der Wasseroberfläche, durch Wind bewegtes Blätterdach, Wachstumsunterschiede der Vegetation, abgeerntete und gepflügte Felder.

Die absolute Phase f_{unw} kann als eine Summe mehrerer Einflußgrößen beschrieben werden:

$$f_{unw} = f_{topo} + f_{displ} + f_{path} + f_{noise} \quad (6)$$

Die Bedeutung der Terme ist wie folgt:

f_{topo} :	Topographische Phasenkomponente,
f_{displ} :	Verschiebungskomponente,
f_{path} :	Atmosphärische Komponente (unterschiedliche atmosphärische Bedingungen bei den Aufnahmen),
f_{noise} :	Thermisches Rauschen im Radarsystem.

Für eine Abschätzung des Potentials des dInSAR-Verfahrens zur Erfassung bergbaubedingter Bodenbewegungen muß die interferometrische Phase in Abhängigkeit der Geländehöhe betrachtet werden, siehe Gleichung (7):

$$df_{topo} = \frac{4p}{l} \frac{B_{\perp}}{r \cdot \sin q} dh \quad (7)$$

mit: Wellenlänge l , der Basislinienkomponente rechtwinklig zum Beobachtungsvektor $B_{\perp}$, dem Einfallswinkel q und der Schrägentfernung r . Die Kenntnis der Basisliniengeometrie aus den Orbitdaten und der topographischen Phase f_{topo} erlaubt die Berechnung der exakten Blickwinkel und der anschließenden Ableitung der Oberflächentopographie.

Der Verschiebungsterm f_{displ} ist direkt mit der *kohärenten* Verschiebung des Streuers am Boden in Richtung des Beobachtungsvektors r_{displ} verknüpft:

$$f_{displ} = 2 \cdot k \cdot r_{displ} \quad (8)$$

wobei k für die gesamte Anzahl der Wellen entlang des Beobachtungsvektors steht. In diesem Zusammenhang bedeutet *kohärent* eine gleiche Verschiebung für benachbarte Rückstrahlelemente. Unter der Annahme, daß nur vertikale Bewegungen stattgefunden haben, kann Gleichung (8) folgendermaßen umgestellt werden,

$$f_{displ} = \frac{2 \cdot k \cdot r_{sub}}{\cos q} \quad (9)$$

wobei r_{sub} die vertikale Verschiebungskomponente ist. Der Term f_{displ} ist sehr empfindlich gegenüber Oberflächendeformationen. Im Falle der ERS-Satelliten entsprechen $2p$ Phasenverschiebung einer Verschiebung von etwa 2.7 cm entlang des Beobachtungsvektors, was, bedingt durch die Aufnahmegeometrie, einer Senkung von 3 cm bezogen auf die vertikale Komponente entspricht (s. Abb. 2).

Liegt eine lokale, homogene Bodenbewegung vor, dann kann eine vertikale Verschiebungsrichtung angenommen werden [11]. Im Falle der bergbaubedingten Bodenbewegungen ist jedoch das zu beobachtende Senkungsverhalten komplizierter, die Senkungsbeträge sind sehr hoch und es treten dreidimensionale Bewegungen in Richtung des Abbauzentrums auf. Ohne Zuhilfenahme zusätzlicher Informationen über den untertägigen Abbau kann auch die kombinierte Auswertung von Aufnahmen im Ascending- und Descending-Modus nicht die komplette Auflösung des dreidimensionalen Vektorfeldes leisten.

3. Datengrundlagen: Referenzdaten der DSK

3.1 Photogrammetrische Daten:

Zur Betrachtung der unterschiedlich erfaßten Höheninformationen lag es nahe, auf die in der Geodatenzentralbank (GDZB) vorliegenden flächenhaften Daten der Bildflugauswertungen als grundlegendes Koordinatensystem zurückzugreifen. Als Referenzpunkte zum Verschneiden der unterschiedlichen Datenebenen dienen die Koordinaten der zu den Bildflügen gemessenen photogrammetrischen Paßpunkte. Diese Punkte konnten auch noch nach mehreren Jahren im Gelände aufgefunden werden. Die an analytischen photogrammetrischen Auswertegeräten gemessenen Höhenmodelle für UVS-Gebiete, Halden und Werksgelände stellen die großflächige Grundlage dar, denn sie können über Senkungsnachberechnungen auf Zeitpunkte der satelliten- oder flugzeuggetragenen Daten abgesenkt und wiederum beurteilt werden [12].

Die Gauß-Krüger-Koordinaten beruhen auf einem alten geodätischen Datum, zeitgemäße GPS-Messungen können jedoch nur unter Zwang in dieses Datum übertragen werden. Somit treten bereits bei diesem Arbeitsschritt Differenzen zwischen den Bezugskoordinatensystemen auf, so daß zur erneuten Paßpunktbestimmung die Kenntnis über die angewandten Meßverfahren, das jeweilige Referenzsystem oder den Lagestatus vonnöten ist.

3.2 Terrestrische Meßdaten:

Bei DSK wurden umfangreiche, den Abbau begleitende terrestrische Messungen durchgeführt. Allerdings ist die Qualität der Daten den zu den jeweiligen Zeitpunkten vorherrschenden Bedürfnissen angepaßt und daher nicht immer in einem einheitlichen Format vorhanden. So sind oftmals nur Beobachtungslinien eingerichtet worden, auf denen Längen- und Höhenänderungen, jedoch nicht die Lagekoordinaten der Meßpunkte vermessungstechnisch registriert wurden.

Für die derzeitigen Untersuchungen lagen nur für Recklinghausen GPS-gestützte dreidimensionale Koordinaten der Beobachtungslinien vor.

Die Punkte der Beobachtungslinien für den Bereich Gelsenkirchen-Erle / Parkstadion wurden nachträglich aus dem Reißwerk im Maßstab 1:2000 digitalisiert. Hierbei kann, bedingt durch den Papierverzug und die Abgreifgenauigkeit, mit einer Lagegenauigkeit der digitalisierten Punkte von ± 2 Metern gerechnet werden.

Die noch auffindbaren Punkte der Beobachtungslinien zur Bauhöhe 480 in Dorsten wurden im Mai 2001 nachträglich über einen GPS-gestützten Polygonzug koordiniert, nachdem sich herausstellte, daß die Lage der Punkte von Hand in die TK50 eingetragen wurde und es vereinzelt zu nicht tolerierbaren Lagefehlern kam.

Nachdem nun die Punkte nachträglich koordiniert und in ein einheitliches Datum eingebunden wurden, konnte deren weiterführende Höheninformation zur Bewertung der satelliten- und flugzeuggetragenen Daten herangezogen werden. Diese Punkte können auch weiterhin als Referenzpunkte dienen, so z.B. als Standpunkte für Corner-Reflektoren oder zur Einrichtung von permanenten GPS-Stationen, z.B. mit dem *GOCA-GPS* System, das von der *FH Karlsruhe, FB Geoinformationswesen, Institut für Innovation und Transfer (ITT)* in Zusammenarbeit mit der Firma *EURONAV GmbH* entwickelt wurde [13]. Da bei diesem System ein ständiger Kontakt zwischen der Referenzstation und den Rover-Stationen, z.B. über Richtfunkstrecken, bestehen muß, kann es nur zu einer punktwisen 3-D Überwachung von einzelnen Objekten (Gebäuden) oder Lineamenten aus fest installierten Punkten eingesetzt werden. Ein großräumig-flächendeckender Einsatz ist nicht möglich, allerdings kann die Information über die relativen dreidimensionalen Verschiebungen der Rover-Stationen zur Referenzstation für die dInSAR-Prozessierung herangezogen werden. Mit dem *GOCA*-System wurden in den Jahren 2000 / 2001 in Recklinghausen vier permanente Stationen zur Überwachung des Abbaus des Flözes „Dickebank“, Bauhöhe 408, von der *Deutschen Montan Technologie GmbH (DMT)* betrieben.

3.3 Bodenbewegungsberechnungen:

Seit dem 01.07.2001 werden bei der DSK-Ruhr Bodenbewegungsvorausberechnungen (BBVB) [14] mit dem Programmpaket *CadBERG* der Firma *GeTec* durchgeführt. *CadBERG* ist eine *AutoCad*-Applikation und bietet speziell bei der Handhabung und der grafischen Auswertung große Vorteile gegenüber der bisherigen Bearbeitungsweise mit Großrechnerprogrammen. Darüber hinaus sind mit *CadBERG* weiterführende Parametereinstellungen für eine BBVB möglich.

Beide Systeme arbeiten nach dem stochastischen Verfahren und liefern bei gleicher Parameter-einstellung nur unwesentlich voneinander abweichende Berechnungsergebnisse. Bei den vorliegenden Auswertungen sollte die Zeitdifferenz zwischen den terrestrischen Messungen und den InSAR-Daten durch eine Senkungsnachberechnung ausgeglichen werden. Dazu wurden die Abbaugeometrie, Abbaustände, Mächtigkeit und der Versatz den Abbaugrundrissen entnommen. Die vorhandenen Beobachtungslinien dienten dabei unter anderem zur Bestimmung der Wirkungswinkel und der zeitlichen Konvergenz.

3.4 Geodatenzentralbank (GDZB):

Seit etwa 12 Jahren ist an verschiedenen Stellen innerhalb DSK die Geoinformationstechnologie im Einsatz. Aufgaben aus verschiedenen tagesoberflächenbezogenen Themen und Fachbereichen werden mit Hilfe der GIS-Technologie bearbeitet, wobei die Erfassung, Verarbeitung, Analyse und Präsentation von Geodaten zum Kernbereich der Planungstätigkeiten und täglichen Arbeiten zählen.

Aus diesen Projekten sind seither durch eigene Erfassung, Zukauf oder Konvertierung aus anderen Quellen hochwertige Datenbestände entstanden, die derzeit nach Projektvorgaben direkt verwendet werden, oder nach Standardisierung und Homogenisierung in einem zentralen Datenpool beim *Dienstleistungsbereich Ingenieurvermessung/Geoinformation* (DIG) verwaltet werden. Auf diesen Datenpool greifen Nutzer aus unterschiedlichen thematischen Bereichen zu, um zusammen mit den projektbezogenen Daten ihre Aufgaben zu erledigen.

DSK entwickelt und richtet die unternehmensweite Geodatenzentralbank ein, die Federführung liegt beim *Dienstleistungsbereich Ingenieurvermessung/Geoinformation* (DIG).

4. Auswertung

4.1 Satellitenszene - Ruhrgebiet:

Das Potential der differentiellen SAR Interferometrie zur Erfassung von Bodenbewegungen wurde sichtbar, nachdem von GAMMA Interferogramme für den Bereich des gesamten Ruhrgebietes erstellt wurden, und bereits in den ohne zusätzliche Informationen prozessierten Daten die trichterförmigen Bewegungsmuster der Phasenzyklen, die sogenannten *Fringes* (s. Kapitel 2), erkennbar waren (s. Abb. 3, links).

Als dann die über die TK50 grob georeferenzierten Interferogramme von der Größe einer ganzen Satellitenszene von 100 km x 100 km mit der Lage der Abbauflächen zu den Aufnahmezeitpunkten überlagert wurden, zeigten diese eine gute Übereinstimmung der Zentren der Phasenzyklen mit den zu den Zeitpunkten laufenden Bauhöhen auf (s. Abb. 3, rechts) [15].

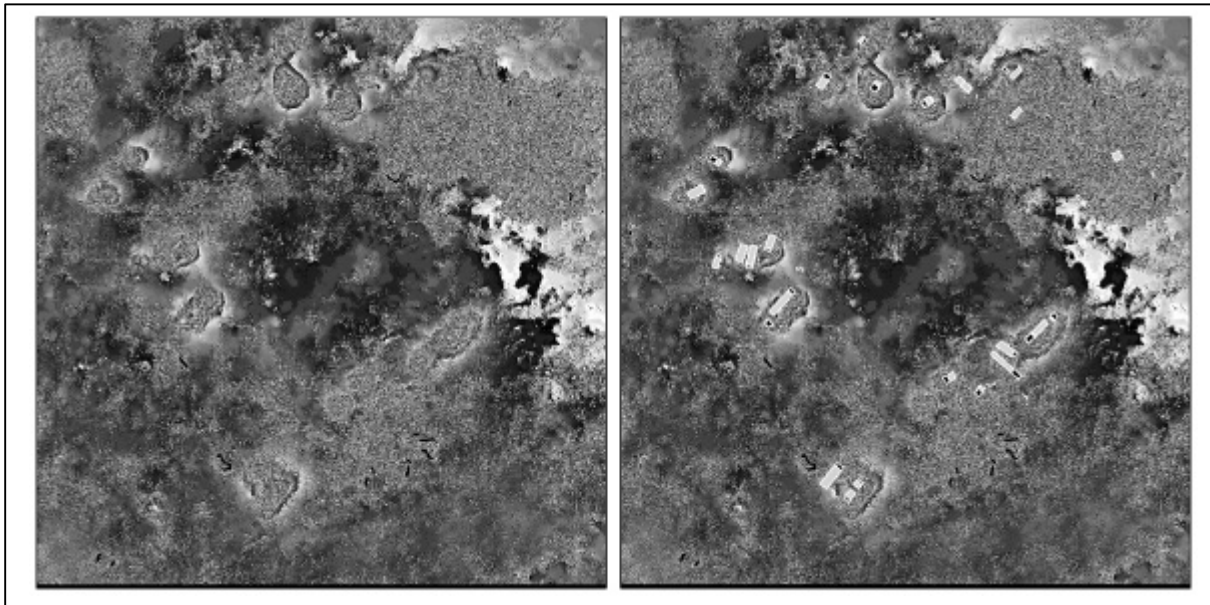


Abbildung 3: Interferogramm für den Zeitschnitt vom 19.12.1996 bis zum 27.02.1997. Links ohne, rechts mit der Überlagerung der zum jeweiligen Zeitpunkt laufenden Bauhöhen. (Grau: 19.12.1996, schwarz: 27.02.1997). Ausschnitt: 25 km x 25 km.

Diese ersten Ergebnisse, die ohne jegliche stützende Information durchgeführt wurden, erschienen so vielversprechend, daß genauere Untersuchungen mit zusätzlichen Daten für kleinere ausgewählte Gebiete erfolgten. Zur weiteren dInSAR-Auswertung wurde ein Zeitraum bestimmt, für den bei DSK Referenzdaten vorlagen. An GAMMA erging der Auftrag, für die Jahre 1995 bis Mitte 1997 (Gelsenkirchen und Dorsten) und 2000 (Recklinghausen) geeignete ERS-Szenen aus dem Archiv herauszusuchen und zu bestellen. Bei DSK erfolgte die Zusammenstellung von entsprechenden digitalen Geländemodellen, Beobachtungslinien und Informationen über die jeweils vorliegende Abbausituation. Die Senkungsbeträge wurden dann, unter Berücksichtigung der Parameter der BBVB, auf das Datum der Satellitenaufnahmezeitpunkte umgerechnet.

4.2 Auswertung: Gelsenkirchen-Erle / Parkstadion:

Für diesen Bereich lagen mehrere Nivellementlinien und ein an analytischen photogrammetrischen Auswertegeräten gemessenes DGM eines Bildfluges von 1990 vor. Das DGM wurde auf ein 5 Meter Raster mit Dezimeter-Höhenstufen umgerechnet und zusammen mit den Rasterbildern der TK50, der DGK5 und den Höhen- und Abbaufinformationen an *GAMMA* geschickt. Abbildung 4 zeigt die Lage der für die weiteren Auswertungen verwendeten Beobachtungslinien:

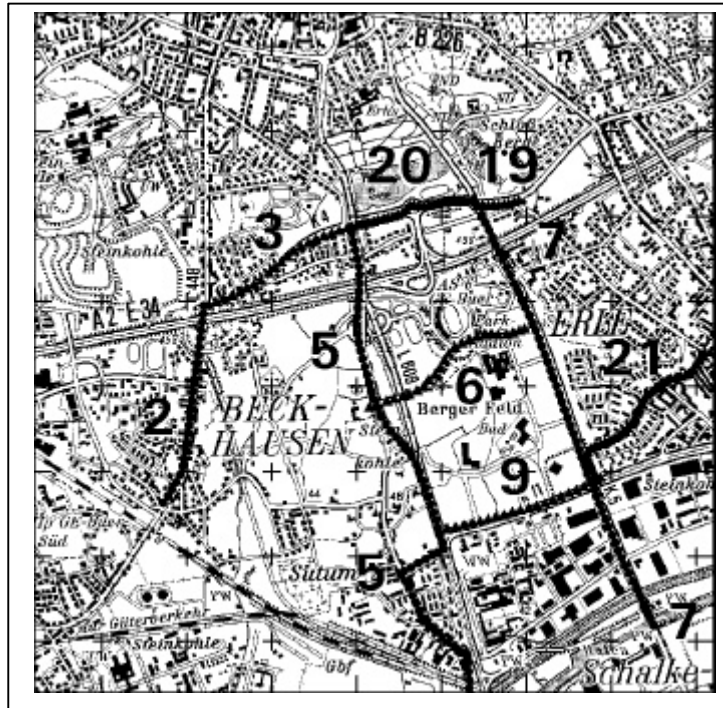


Abbildung 4: Lage der Nivellementlinien des Bergwerks Ewald/Hugo im Gebiet Gelsenkirchen-Erle, Parkstadion. Bereich: 4 km x 4 km.

Tabelle 2: Nivellementlinien des Bergwerks Ewald/Hugo:

Linie	Länge [km]	Punktzahl	davon zerstört	Punktabstand [m]
2	1,2	26	5	50
5	3,3	70	6	50
7	2,7	55	6	50
3-20-19	2,1	58	6	50/30/30
6	1,2	24	-	50
9-21	2,5	62	2	50/30

Bei *GAMMA* wurde dann die DGM-gestützte dInSAR-Prozessierung sowie eine Geokodierung der Interferogramme auf Basis der TK50 durchgeführt. Danach erfolgte die großflächige Überlagerung der Interferogramme mit den Abbaubereichen und ein punktueller Vergleich der unabhängig voneinander ermittelten Senkungsbeträge auf den Nivellementpunkten.

Der Vergleich der Nivellementauswertung mit den Senkungsnachberechnungen (s. Abb. 5, o.l.) zeigt, daß in einem Bereich westlich des Parkstadions Anomalien auftreten. Um die Gründe für diese Anomalien konkret aufzeigen zu können, wäre ein sehr großer Berechnungsaufwand nötig. Höchstwahrscheinlich blieben Einwirkungen eines vor dem Betrachtungszeitraum eingestellten Abbaus (1993) „im Gebirge stecken“ und machten sich erst bei erneuter Durchbauung (1995) an der Tagesoberfläche bemerkbar. Aus diesem Grunde wurde zur Beurteilung der dInSAR-Auswertung auf die Hilfe der Bodenbewegungsvorausberechnungen zur Interpolation der gemessenen Nivellementhöhen auf die Satellitenzeitpunkte verzichtet und stattdessen zwischen den Terminen linear interpoliert. Die somit entstehenden Abweichungen sind vernachlässigbar.

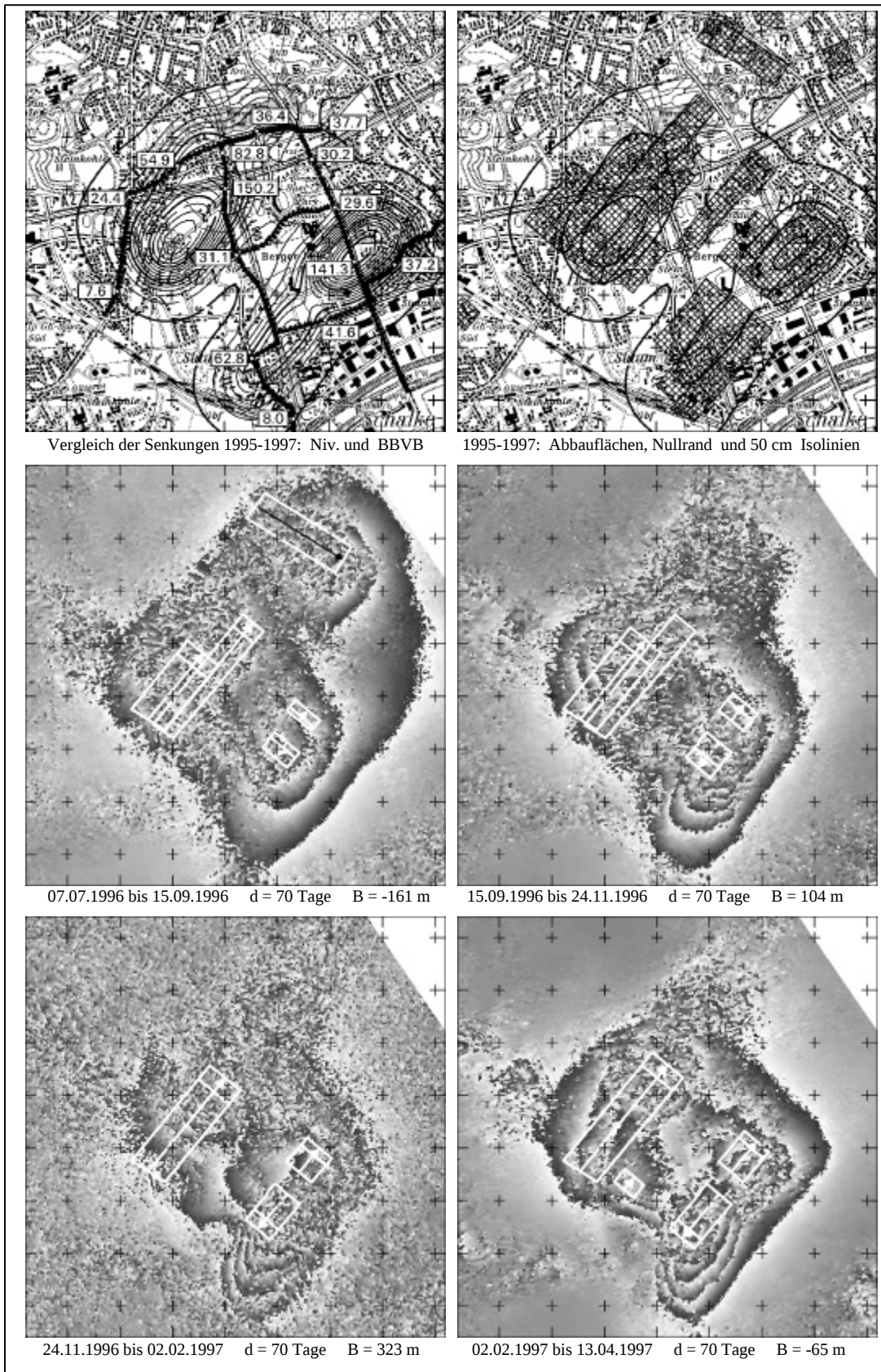


Abbildung 5: BBVB-Darstellung mit 10 cm Isolinien der Senkungen und Vergleich mit ausgewählten Punkten der Nivellementlinien (o.l.). Abbauflächen von 1992 bis 1997, überlagert mit 50 cm Senkungsäquidistanz (o.r.). Interferogramme für den Zeitraum vom 07.07.1996 bis 13.04.1997, jeweiliger Abstand 70 Tage, geokodiert und überlagert mit der TK50, sowie den zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt laufenden Bauhöhen (mittlere und untere Reihe). Bildausschnitte: 4 km x 4 km.

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, daß für den Zeitraum vom 24.11.1996 bis zum 02.02.1997 die Phasenzyklen nicht so gut auflösbar sind, wie für die anderen Zeiträume. Das ist hauptsächlich durch die größere Basis zwischen den Satellitenpositionen von 323 m bedingt, was zu einer geringeren Kohärenz zwischen den beiden Aufnahmen führt, wodurch das *Phase-Unwrapping* erschwert wird. Weiterhin ist in den Interferogrammen die räumliche Abgrenzung des Einwirkungsbereiches wiedergegeben und die Abfolge der Phasenzyklen deckt sich mit der Lage des einwirkenden Abbaus. Sehr gut zu erkennen ist eine fast geradlinige stationäre Kante im südöstlichen Bereich, die Senkungs- und statische Bereiche trennt. Dieses Bewegungsverhalten ist auf die besonderen tektonischen Verhältnisse in diesem Gebiet zurückzuführen.

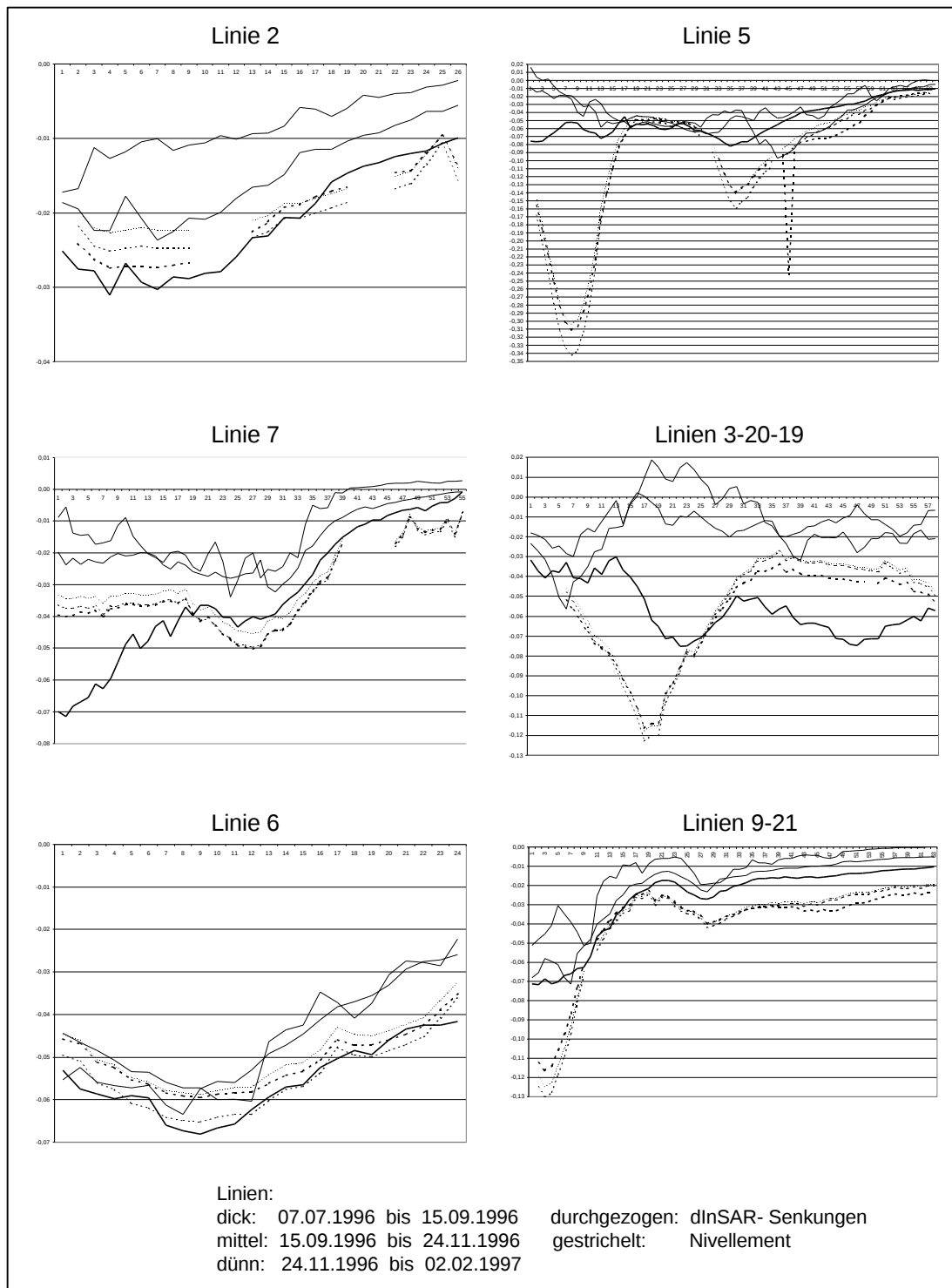


Abbildung 6: Vergleich der gemessenen Höhenänderungen mit den, nur über das photogrammetrische DGM gestützt prozessierten, dInSAR-Senkungen. Angaben in [cm].

Die Graphiken zu den Nivellementlinien in Abbildung 6 sind so aufgebaut, daß die Einheiten der Hochachse je einen Zentimeter Senkung repräsentieren.

Die dInSAR-Profile weisen Ähnlichkeiten mit gemessenen Senkungen und eine gleiche Tendenz für Senkungsbeträge von 0 cm bis etwa 8 cm auf. Somit konnten mit Hilfe des *Phase-Unwrapping* bereits Bewegungen erfaßt werden, die größer als die Wellenlänge des ERS-Radars sind, wobei keine weiteren Höheninformationen als das photogrammetrische DGM von 1990 verwendet wurden.

Zudem liegen die aus den Satellitendaten ermittelten Beträge etwas oberhalb der gemessenen Senkungen. Hier kann es sich um einen Offset handeln, der entsteht, wenn z.B. ein als fest angenommener Referenzpunkt zur dInSAR Berechnung nicht in stabilem Gelände liegt. Der Offset ist über eine Lageangleichung anpaßbar.

Der Vergleich der Senkungswerte auf der Linie 3-20-19 zeigt auf den ersten Blick eine niedrige Genauigkeit der Ergebnisse der Radarauswertung. Es ist jedoch in den Interferogrammen in Abbildung 5 zu erkennen, daß im Umfeld der Linie 3-20-19 eine niedrige Kohärenz und somit ein starkes Phasenrauschen vorliegt, womit diese Information als unzuverlässig erkannt und herausmaskiert werden kann. Ein Hauptgrund für die niedrige Kohärenz sind die hohen Phasengradienten, deshalb kann die Verwendung eines Senkungsmodells die Auswertung unterstützen, da durch Subtraktion des Modells die Phasengradienten verringert werden.

Sehr gut fällt der Vergleich der per Nivellement gemessenen Senkungen mit der dInSAR Auswertung für die Linien 2, 6 und 7 aus. Die Differenzen zu den Nivellementwerten liegen im Bereich der Meßgenauigkeit terrestrischer Meßverfahren in bergbaubeeinflusstem Gebiet.

Es muß hier noch einmal darauf hingewiesen werden, daß eine weitere Genauigkeitssteigerung zur dInSAR Berechnung möglich ist, wenn in einem weiteren Berechnungsschritt auch noch die Höhen der Nivellementpunkte oder GPS-Messungen als Modellansatz stützend einfließen (s. Kapitel 4.3).

4.3 Auswertung: Recklinghausen

Die dInSAR Berechnungen für Recklinghausen finden gerade statt, so daß bisher nur erste Vergleiche zu präsentieren sind (s. Abb. 7). Als Referenzgrundlage für Recklinghausen liegt wiederum ein photogrammetrisches DGM des Bildfluges von 1990 vor. Allerdings sind vor Abbaubeginn des Flözes „Dickebank“ (Bauhöhe 408) im Juli 2000 und abbaubegleitend im Abstand von drei Wochen Höhenmessungen von der *Technischen Fachhochschule Georg Agricola* (TFH), Bochum, auf den Beobachtungslinien durchgeführt worden. Die Punkte wurden GPS-gestützt eingemessen und per Polygonzug koordiniert. Etwa 90 Punkte dieser Nivellementlinie und weitere noch auffindbare photogrammetrische Paßpunkte sind im November 2000 und im Mai 2001 zeitnah zu den ERS-Aufnahmen mit eigenen, im Rahmen des FuE-Projektes geplanten, GPS-Kampagnen aufgenommen worden, so daß in diesem Falle die Nivellementlinien, Paßpunkte und DGM in einem gemeinsamen Datum erfaßt vorliegen.

Zudem gibt es im Stadtgebiet vier fest installierte, von der DMT betriebene GOCA-GPS Stationen, wobei die senkungsbeeinflussten drei Rover-Stationen ihre relativen Verschiebungen an die als fest angenommene Station auf dem Dach der Markscheiderei des BW Blumenthal/Haard melden. Diese feste Referenzstation wurde ebenfalls im Rahmen der GPS-Messungen über einen Vorwärtsschnitt eingebunden.

Für Recklinghausen ist weiterhin im Rahmen des Forschungsprojektes geplant, nicht nur die vertikale Bewegungskomponente, sondern auch echte 3-D Bewegungen aus den Satellitendaten abzuleiten (s. Kapitel 2). Die 3-D-Prozessierungen werden derzeit durchgeführt. Es liegen für Recklinghausen bereits erste Vergleiche der dInSAR-Senkungsberechnungen mit den auf den Nivellementlinien gemessenen Höhenänderungen vor, die in Abbildung 8 vorgestellt werden.

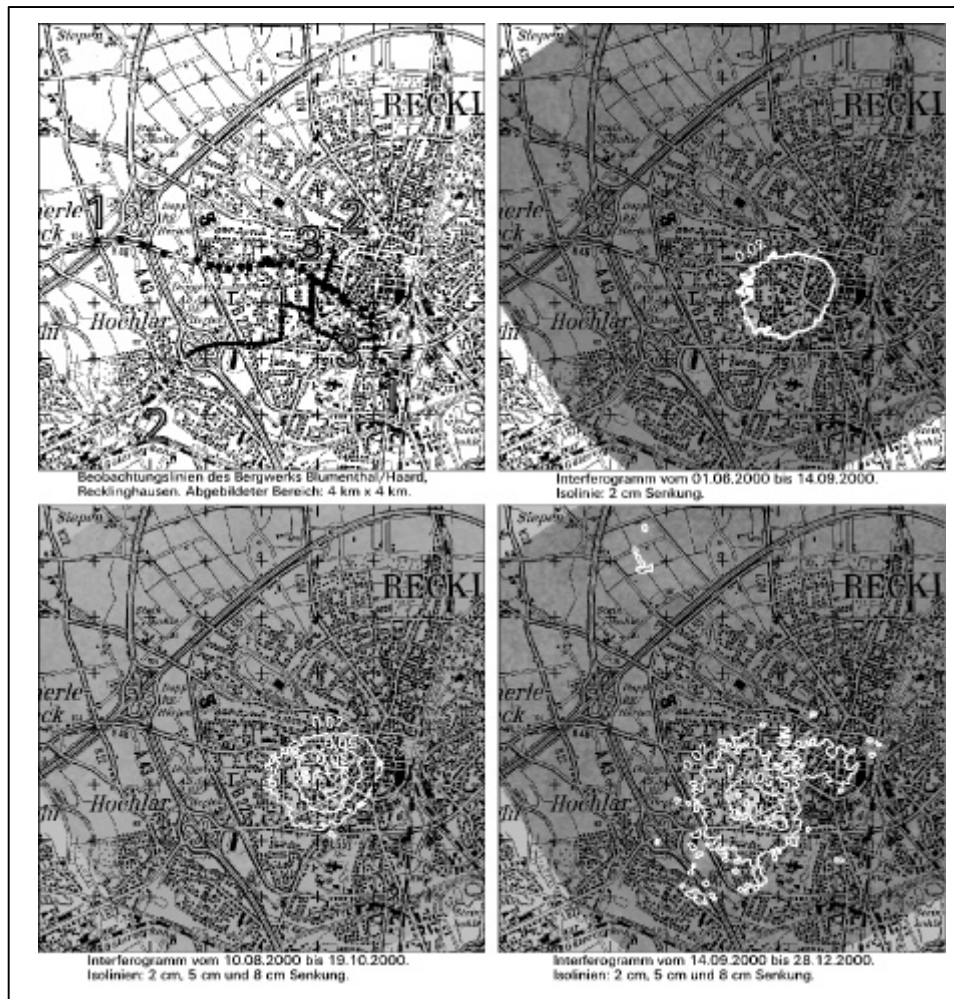


Abbildung 7: Lage der Nivellementlinien des Bergwerks Blumenthal/Haard, Recklinghausen. dInSAR-Senkungen überlagert mit abgeleiteten Isolinen. Gebiet: 4 km x 4 km.

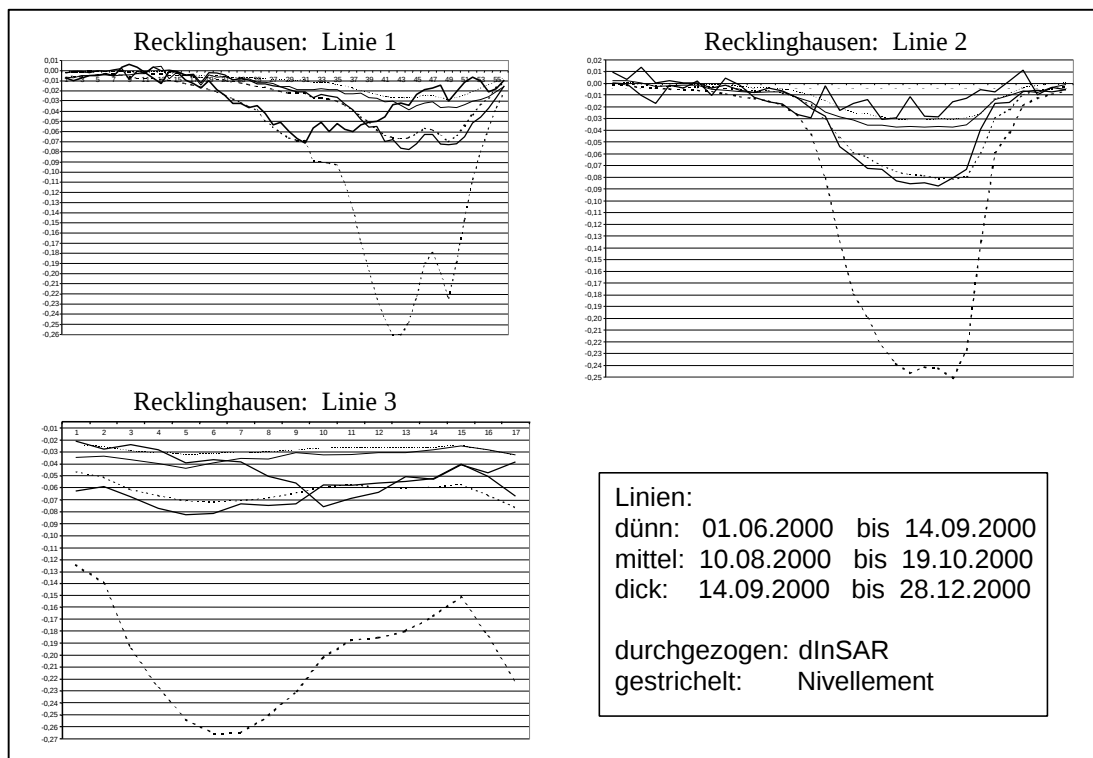


Abbildung 8: Vergleich der auf den Nivellementlinien gemessenen mit den über das dInSAR-Verfahren ermittelten Senkungen. Angaben in [cm].

Der Vergleich der Senkungen zeigt für Bewegungen bis zu einem Betrag von 0 cm bis etwa 8 cm eine gute Übereinstimmung der interferometrisch ermittelten zu den terrestrisch gemessenen Höhenänderungen. Für größere Bewegungsraten ist es dem dInSAR-Verfahren nicht mehr möglich, die Mehrdeutigkeiten der Phasen so aufzulösen, daß der gesamte Senkungsverlauf repräsentiert werden kann.

Jedoch zeigen die Auswertungen ein sehr hohes Potential zur großflächigen Erfassung von Senkungen im Bereich von wenigen Zentimetern, wenn z.B. das *Phase-Unwrapping* um einen Modellansatz unter Verwendung stützender Höheninformationen aus der DSK-Datenbank (GDZB) erweitert prozessiert wird. Diese unterstützenden Höheninformationen lagen für Recklinghausen von vornherein als Lage- und Höhenkoordinaten der regelmäßigen Nachmessungen auf den Beobachtungslinien vor und wurden in einem zweiten Schritt beim *Phase-Unwrapping* als zusätzliche Informationen verwendet, so daß zur Lösung der Mehrdeutigkeiten ein aus den Höhenmessungen abgeleitetes Bewegungsmodell in die Berechnungen aufgenommen wurde.

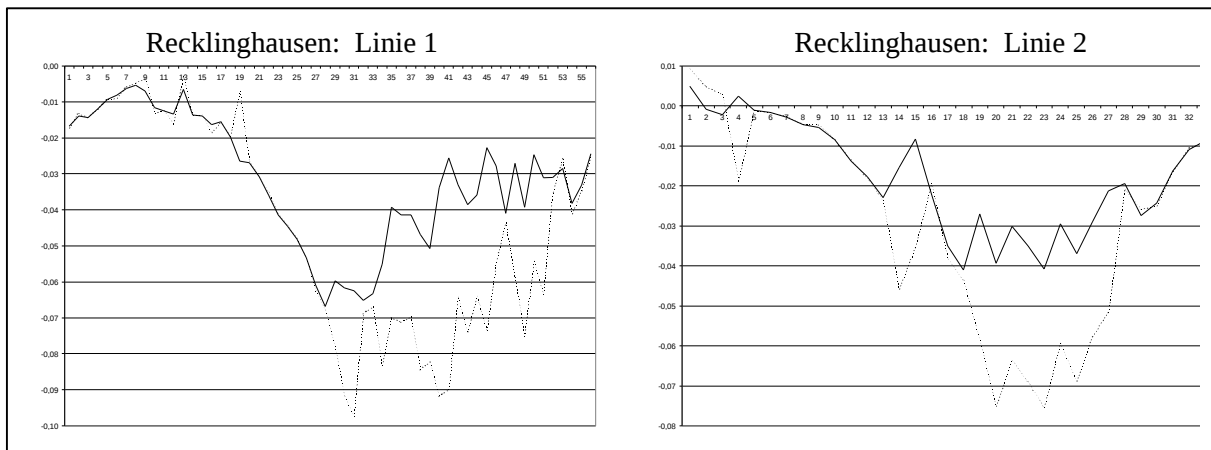


Abbildung 9: Erweiterung des Detektionsbereichs beim *Phase-Unwrapping* über Verwendung eines Modellansatzes am Beispiel der Senkungen auf den Nivellementlinien 1 und 2 im Stadtbereich von Recklinghausen. (Durchgezogene Linie ohne, gepunktete Linie mit Modellansatz). Angaben in [cm].

Die Abbildung 9 zeigt für die Nivellementlinien 1 und 2 den Vergleich der Senkungsbeträge des *Phase-Unwrapping* mit dem gerade entwickelten, ersten Modellansatz. Dieser ist ein erster Verbesserungsansatz, der sich noch im Entwicklungsstadium befindet. Es ist ersichtlich, daß mit dem stützenden Modell der Detektionsbereich von vorher maximal 6 cm bis 8 cm nun auf ca. 7 cm bis 10 cm erweitert werden konnte.

Diese ersten Vergleiche zeigen, daß das dInSAR-Verfahren sensibel für Gebiete mit beginnenden Einwirkungen ist, und somit, entgegen der nur punktuellen oder linienhaften Informationen der Nivellementpunkte, sehr gut eine räumliche Erfassung und Darstellung des Randes des Senkungstrogens geben kann. Die Höheninformationen der Beobachtungspunkte aus Nivellements oder GPS-Messungen sind unabdingbar für die Erfassung absoluter Senkungen und bilden die Grundlage für ein verbessertes *Phase-Unwrapping*.

Mit dem dInSAR-Verfahren steht somit der DSK ein Auswertesystem zur guten Parameterschätzung für zukünftige Bodenbewegungsberechnungen zur Verfügung.

4.4 Auswertung Dorsten:

Für Dorsten liegen bereits berechnete Interferogramme vor. Im Mai 2001 wurden die Punkte der Beobachtungslinien zur Bauhöhe 480 per GPS-gestütztem Polygonzug nachgemessen und werden momentan prozessiert. Die Vergleiche mit den Interferogrammen sind auf diese Koordinaten angewiesen und können erst später ausgewertet werden. Auf eine weitere Darstellung wird deswegen verzichtet.

4.5 Auswertung: AEROSENSING AeS-1 - Flugzeugradar:

Die Radar-Befliegung des Gebietes Recklinghausen-Haltern mit einer Größe von etwa 90 km² fand Anfang April 2001 bei starken Windböen und durchziehenden Regenfronten unter sehr ungünstigen Wetterbedingungen statt.

Die Allwettertauglichkeit des Systems zeigt Abbildung 10, wo im linken Bildbereich die Lage von je einem Ausschnitt der im X-Band (cm-Wellenlänge) und im P-Band (dm-Wellenlänge) aufgenommenen interferometrischen Phasenbilder in der TK50 dargestellt ist. Im P-Band Phasenbild (rechts oben) ist die Lage der zur Georeferenzierung im Gelände aufgestellten Corner-Reflektoren im Bilddatensatz erkannt und markiert worden. Die großen Kreise beschreiben die Standpunkte der großen Reflektoren für die P-Band Aufnahme, die kleineren Kreise die Lage der kleinen X-Band Reflektoren, die auch im Datensatz erkannt werden konnten. Im Ausschnitt des X-Band Phasenbildes rechts unten sind bereits topographische Kleinformen erkennbar, die einen bildhaften Eindruck vermitteln. Auch in diesem Ausschnitt sind die X- und P-Band Corner-Reflektoren zu erkennen, so daß bereits diese Bilddatensätze, über die per GPS bestimmten Koordinaten, mit den bei DSK vorliegenden Datenbeständen verschnitten werden können.

Die Prozessierung der Radar-Höhenmodelle wird derzeit durchgeführt, so daß noch keine DGM vorgestellt werden können. Die P-Band Daten versprechen eine Ableitung von DGM in Waldgebieten von etwa einem Meter Höhengenaugkeit, die X-Band Daten werden mit den Höhenmodellen der HRSC-A Kamera [16], [17] vergleichbar sein, so daß eine Höhengenaugkeit von 20 cm erwartet wird. Über die jeweiligen DGM werden die X-Band und P-Band Phasenbilder orthorektifiziert, so daß zwei zusätzliche, in jedem Bildpunkt maßstäbliche, Datensätze mit bildhaften Informationen für die Höhenmodelle vorliegen.



Abbildung 10: Lage zweier AeS-1 X-Band und P-Band Radar Ausschnitte in der TK50 (links), interferometrische Phasenbilder des P-Bandes (o.r.) und X-Bandes (u.r.), überlagert mit der Lage der Corner-Reflektoren (Kreise). Bereich der TK50: 5 km x 5 km.

4.6 Auswertung: Einbindung in die GDZB

Im Kapitel 3.1 wurde beschrieben, wie aus dem gemeinsamen Geodatenbestand, der GDZB der DSK, Referenzdaten entnommen wurden. Dementsprechend sollen auch die Resultate der SAR-Daten in ihren verschiedenen Ergebnisarten und -typen (als Rasterbild oder als Konturierung in Vektorform) der GDZB zugeführt werden. Aus diesem zentralen Datenpool ist der Zugriff unterschiedlichster Anwender und Nutzer gewährleistet, die diese Daten mit in ihre Beurteilungs- und Entscheidungsprozesse einbinden können.

Für alle gewonnenen Daten bietet die GDZB die Möglichkeit, diese für alle potentiellen Nutzer einzubinden: sowohl für die Bearbeitung der Aufgaben, für die Laufzeit eines Projektes oder zur Bereitstellung im Unternehmen. Dabei soll das Spektrum der Anwender bedient werden, vom GIS-Fachmann, der mit Geoinformation vertraut ist und die dazu notwendigen digitalen Werkzeuge (Software, Hardware) besitzt, bis z.B. zum Sachbearbeiter Bergschadensthematik, der auf einfache Weise und mit einfachen Werkzeugen sich den Sachverhalt im räumlichen Zusammenhang darstellen lassen will. Für die erste Gruppe stehen die professionellen Werkzeuge der GIS-Technologie zur Verfügung, im Bereich der DSK ist dies *ArcInfo* des GIS-Systemherstellers *ESRI*. Für letztere wird es im Rahmen von Auskunftsarbeitsplätzen Lösungen geben, die lediglich einen Internet-Browser benötigen, welche die dInSAR-Daten und andere Betriebs-, Fach- und Basisinformationen in kartographischer Form darstellen. Die sogenannte Map-Server-Technologie bedient diese Arbeitsplätze mit geringeren hardwaretechnischen Anforderungen und ermöglicht auch GIS-unerfahrenen Anwendern ein leichte Zugänglichkeit zu dieser Informationsebene. Dazwischen wird es skalierbare Lösungen geben, die auch andere, bei DSK verfügbare Client-Software (*ArcVIEW*, *AutoCAD MAP*) usw. bedienen kann. Die folgende Abbildung zeigen Beispiele zur Darstellung und Bereitstellung von Geodaten im Intranet:

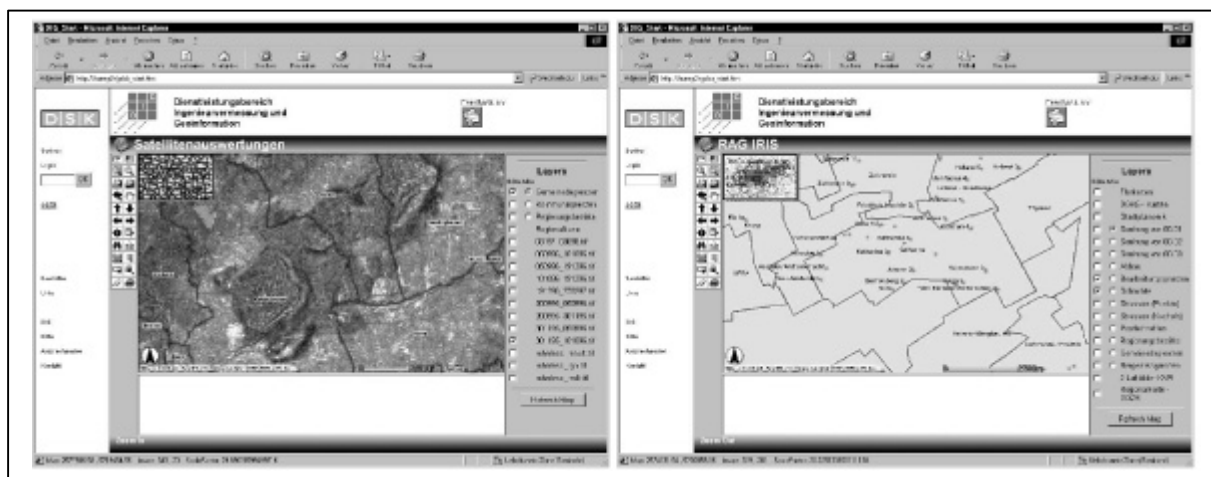


Abbildung 11: Darstellung verschiedener Epochendifferenzen der InSAR-Daten im Browser, zusammen mit vektoriellen Zusatzinformationen (links) und Geo-Betriebsinformationen im Intranet der DSK (rechts).

5. Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse und Ausblick

Die vorgestellten Auswertungen sind erste Teilergebnisse eines laufenden FuE-Projektes. Die bislang gewonnenen Erkenntnisse werden im Rahmen des Forschungsprojektes weiterhin untersucht und überprüft.

Die bisherigen Ergebnisse der satellitengetragenen Auswertungen haben für Teilbereiche der DSK-Ruhr gezeigt, daß die dInSAR-Verfahren für Bewegungsraten bis zu einem Dezimeter innerhalb des Beobachtungszeitraumes zwischen zwei Satellitenaufnahmen gute Übereinstimmungen mit terrestrischen Vermessungen zeigen. Bei Senkungsraten größer etwa 10 cm für jeweils einen Betrachtungszeitraum ist die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten derzeit auch mit einem modellgestützten *Phase-Unwrapping* noch nicht eindeutig, der Modellansatz wird aber weiterhin modifiziert.

Das bedeutet für den momentanen Projektstand, daß maximale Senkungen nicht nach ihrem Betrag, wohl aber die räumliche Lage des Senkungsschwerpunktes und die Ausprägung des Senkungstrogos großräumig ableitbar sind. Das Ziel ist, ein Modell zu entwickeln, welches es ermöglicht, auch größere Senkungen abzuleiten.

Die Lage des Einwirkungsbereiches (Nullrand) ist hingegen räumlich sehr gut auflösbar und kann, aufgrund der hohen Wiederkehrrate der Satelliten von 35 Tagen, auf diese Weise unterstützend zur Parameterableitung der BBVB herangezogen werden, wobei eine Kombination mit terrestrischen oder GPS-Meßverfahren verspricht, daß absolute Senkungsbeträge sicher abgeleitet werden können.

Aus den ersten im Projekt gewonnenen Erkenntnissen folgt, daß ein zweistufiges Konzept sinnvoll ist, um so:

1. die satellitengestützten dInSAR-Verfahren zum Erfassen von relativen Bodenbewegungen in urbanen Regionen,

und in Kombination mit

2. flugzeuggetragenen InSAR-Verfahren mit mehreren Wellenlängen zur Ableitung von hochgenauen DGM für vegetationsarme Bereiche mit kurzwelligem X-Band, und von DGM mittlerer Genauigkeit in Wald- und landwirtschaftlichen Gebieten mit langwelligerem P-Band-Radar

einzusetzen. Flugzeuggetragene SAR-Systeme können jedoch auch als alleinstehendes Verfahren zur Erfassung von Höhenmodellen (DGM 1. Stufe) und von Bodenbewegungen über Differenzbildung von DGM aus mehreren Befliegungen, sowie zur Bewertung, Erweiterung und Stützung bereits vorliegender, kleinräumiger DGM eingesetzt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten der satellitengetragenen dInSAR-Verfahren können weiterhin unterteilt werden nach,

- der Abgrenzung gegenüber anderen, nicht bergbaubedingten Bodenbewegungen,
 - Grundwasserentnahme,
 - Salztektonik,
 - Tektonik, z.B. „Geo-Traversal“ im Bereich Gladbeck-Marl-Haltern,
- großflächigen Einsatzbereichen, z.B. für das gesamte Ruhrgebiet,
 - Räumliche Bergschadensersteinschätzung,
 - Erfassung bergbaubeeinflusster Bereiche (Übersicht),
- lokalen Einsatzbereichen, zum Beispiel für jedes Bergwerk oder UVS-Gebiet,
 - Erfassung relativer Bodenbewegungen für urbane Bereiche,
 - Erfassung und Dokumentation der Wanderung des Nullrandes,
 - Unterstützung bei der Parameterschätzung zur BBVB,
 - Bergschadensbearbeitung mit Blick auf mögliche Fremdeinwirkungen,
 - Unterstützung des abbaubegleitenden Umweltmonitorings,
- Altbergbau: Erfassung der aktuellen topographischen Situation.

Im weiteren Projektverlauf soll überprüft werden, ob mit einer Kombination aus terrestrischen, photogrammetrischen, sowie flugzeug- und satellitengestützten InSAR-Verfahren die Möglichkeit gegeben ist, die tatsächlichen zwei- oder dreidimensionalen bergbaubedingten Bodenbewegungen zu bestimmen, auch im Hinblick zur Abgrenzung gegen Fremdeinwirkungen.

Unabhängig von den derzeit noch eingeschränkten Auswertebereichen bietet das Verfahren eine Möglichkeit der Beweissicherung für das gesamte Unternehmensgebiet der DSK gegenüber Einsprüchen Dritter, die ebenfalls Zugang zu diesen öffentlichen Daten haben.

Die derzeit aktiven Radar-Satellitensysteme verfügen nur über kurze Wellenlängen von ca. 5 cm, die zur Erfassung von Bodenbewegungen in Gebieten mit hoher Kohärenz, in diesem Fall Stadt- und Siedlungsgebiete, oder in Zeiträumen mit geringer phänologischer Veränderung (Herbst bis Frühjahr) auch für den ländlichen Raum, geeignet sind. In Anbetracht der sogenannten „Nordwanderung“ des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet in überwiegend landwirtschaftlich genutzte Gebiete sind Radarsatelliten mit längeren Wellenlängen besser an die Detektion von Bodenbewegungen angepaßt. Ein solches System mit etwa 12 cm Wellenlänge war der japanische JERS-Satellit (1992-1995), es ist aber bereits für 2001 mit dem Start des ENVISAT zu rechnen, der, als Ergänzung zu dem ERS-2 Satelliten, mit diesen Systemen ausgerüstet ist. Ein weiteres System ist der japanische Nachfolger des JERS, das für 2003 geplante ALOS-PALSAR System.

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse nimmt die DSK als Co-Investigator zusammen mit GAMMA an der Bearbeitung und Auswertung der ALOS / JERS und ENVISAT-Daten teil. Für die Übergangsphase bis 2003 können kostenlos Daten des JERS bestellt und im weiteren Projektverlauf auf deren Potential zum Bodenbewegungsmonitoring überprüft werden. Von GAMMA wurde bereits eine Datenrecherche zu den verfügbaren JERS-Daten durchgeführt, die Bestellung der Szenen ist bereits erfolgt.

Somit stehen neben operablen Flugzeugradarsystemen auch in Zukunft weitere Radar-Satelliten zur interferometrischen SAR-Prozessierung zur Verfügung, die Auswertungen auch in den ländlichen Bereichen möglich machen und somit die Abbaubereiche der DSK vollständig abdecken können.

6. Quellennachweis

- [1] FRANKE, P.: Genehmigungsverfahren im Bergbau und in der Entsorgungswirtschaft.
In: Deutscher Markscheider-Verein e.V. (Hrsg.): Wiss. Schriftenreihe im Markscheidewesen, Heft 17/1997, S. 77 - 84.
- [2] BENECKE, N.; BRANDT, S.; FISCHER, C.; SPRECKELS, V.; VOSEN, P.:
Überwachung der Tagesoberfläche im Gebiet des Steinkohlenbergbaus – Nutzung von GIS, Photogrammetrie und Fernerkundung. In: GIS, Heft 1, 1999, S. 34 – 39.
- [3] STROZZI, T.; WEGMÜLLER, U.; WERNER, C.; WIESMANN, A.:
ESA-DUP: Differential interferometric Applications in Urban Areas - Final Report to ESA ESRIN/Contract 14502/00/I-IW, 2001.
- [4] GENS, R.: Quality assesment of SAR interferometric data. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 226. Dissertation, 1998, 141 Seiten.
- [5] WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; TOSI, L.: Differential SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring: Methodology and Examples. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Ravenna, Italy, 24. – 29. September 2000, S. 93 – 105.
- [6] JOECKEL, R.; STOBER, M.: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung.
2. Erweiterte Auflage, Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 18, Stuttgart, 1991.
- [7] KONECNY, G.; LEHMANN, G.: Photogrammetrie. 4., völlig neu bearb. Aufl., Verlag: de Gruyter, Berlin – New York, 1984.
- [8] KRAUS, K.: Photogrammetrie. Dritte durchgesehene Auflage. Ferd. Dümmler^s Verlag, Bonn, 1990.
- [9] SCHWÄBISCH, M.: Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. Diss., Universität Stuttgart. In: DLR-Forschungsbericht 95-25. 125 Seiten.
- [10] WERNER, C.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A.: Gamma SAR and Interferometric Processing Software. In: Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium. Götheborg, Schweden, 16. – 20. Oktober 2000.
- [11] WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.: Land Subsidence in Mexiko City Mapped by ERS Differential SAR Interferometry. In: Proceedings of IGARSS 1999, Hamburg, 28.06. – 02.07.1999. Auf CD-ROM.
- [12] INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND INGENIEURVERMESSUNGEN, UNIVERSITÄT HANNOVER:
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Nutzung von hochauflösenden Satellitendaten zur großräumigen Überwachung der Umweltauswirkungen bergbaulicher Tätigkeiten im Ruhrgebiet, Arbeitspaket 2: Stereoauswertung“. FuE-Vorhaben 0364000 der Deutschen Steinkohle AG, gefördert durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter Förderkennzeichen 50 EE 9652. SPRECKELS, V.; JACOBSEN, K., Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI), Universität Hannover, 2000.
- [13] JÄGER, R.; KÄLBER, S.; SCHWÄBLE, R. (1999): GPS-basierte online Kontroll- und Alarmsysteme (GOCA). Präsentation zu GOCA auf CD-ROM. Erhältlich im Eigenvertrieb des FB Geoinformationswesen der FH Karlsruhe.

- [14] WIELAND, R.: Aspekte zur Wirkungsweise der Modellparameter bei der Vorausberechnung von Gebirgs- und Bodenbewegungen. Vortrag anlässlich der 42. Wissenschaftlichen Tagung des DMV, Cottbus, 22. - 25.09.1999.
- [15] WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; WERNER, C.; WIESMANN, A.; BENECKE, N.; SPRECKELS, V.: Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhrgebiet (Germany) with SAR interferometry. In: Proceedings of IGARSS 2000, Honolulu, USA, 24. – 28. Juli 2000.
- [16] SPRECKELS, V.: Monitoring of Coal Mining Subsidence by HRSC-A Data.
In: Proceedings of ISPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, The Netherlands, 16. – 23. Juli 2000.
Auf CD-ROM.
- [17] WEWEL, F.; SCHOLTEN, F.: Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen mit dem Mehrzeilen-Stereo-Scanner HRSC-A. In: Veröffentlichungen der DGPF-Jahrestagungen, 19. Wiss.-Tech. Jahrestagung der DGPF, 13. – 15. Oktober 1999, U-GH Essen, S. 57 – 66.