

Untersuchung operationeller Aufnahmesysteme zur großflächigen Erfassung von Digitalen Geländemodellen und topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG)

VOLKER SPRECKELS¹

Die Deutsche Steinkohle AG (DSK) ist verpflichtet, die Auswirkungen des untertägigen Abbaus an der Tagesoberfläche zu überwachen und zu analysieren. 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.

In diesem Beitrag werden die Auswertungen und Ergebnisse aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten (FE) der DSK und des Instituts für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover zum Potential und den Grenzen der differentiellen SAR Interferometrie (dInSAR) aus den Radardaten der ERS-Satelliten zur Erfassung von Bodenbewegungen, sowie von flugzeuggetragenen Aufnahmesystemen (aerophotogrammetrische Geländemodelle, Mehrzeilen-Scanner Höhenmodelle, Laser Höhenmodelle sowie Flugzeugradar Höhenmodelle im X-Band und P-Band) zur Ableitung von Digitalen Geländemodellen (DGM) und Digitalen Höhenmodellen (DHM) zum großflächigen Bodenbewegungsmonitoring für städtische und ländliche Bereiche im Ruhrgebiet vorgestellt.

Als Bezugsfläche zur Bewertung der HRSC-A Aufnahmen (DLR Berlin-Adlershof), Laser-DHM (Fa. TopoSys) und Radar-DHM (Fa. AeroSensing) dienen die bei DSK-DIG an analytischen Auswertegeräten gemessenen photogrammetrischen DGM. Da die jeweiligen Datensätze zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, waren zwischenzeitlich diverse große Flächen dem Einfluß bergbaubedingter Bodenbewegungen in der Größenordnung von mehreren Dezimetern ausgesetzt. Um diese unter Senkungseinfluß liegenden Gebiete eingrenzen und bewerten zu können, wurden bei DSK Bodenbewegungsnachberechnungen unter Berücksichtigung der Art und Weise des jeweiligen Abbaus durchgeführt. Die unterschiedlichen Datensätze wurden durch wiederholte GPS-Messungen auf eingemessenen photogrammetrischen Paßpunkten verknüpft, eine Höhenkontrolle konnte in einigen Gebieten über die Höhenmessungen auf fest vermarkten Nivellementlinien der DSK erfolgen.

1 Einleitung

Die Deutsche Steinkohle AG (DSK) betreibt im nördlichen Ruhrgebiet, im Saarland und im Raum Ibbenbüren großflächig untertägigen Steinkohlenbergbau. Die bergbaulichen Aktivitäten in Tiefen um 1000 m führen zu Beeinflussungen an der Tagesoberfläche. Die Auswirkungen auf die Oberfläche setzten, je nach Mächtigkeit des Deckgebirges und der Größe der abgebauten Fläche, nach etwa drei bis sechs Monaten ein und es entsteht eine Senkungsmulde, deren Form u.a. von der Abbauteufe, dem Einfallen und der Mächtigkeit der Flöze sowie

¹ Volker Spreckels, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, im Hause Deutsche Steinkohle AG, Dienstleistungsbereich Ingenieurvermessung/GeoInformation (DSK-DIG), Karlstr. 37-39, 45661 Recklinghausen. Tel.: 02361-308458. E-Mail: spreckels@ipi.uni-hannover.de

der Länge und Breite der Abbaufäche abhängt [WIGGERING 1993]. Nach rund zwei Jahren sind rund 80% der maximal zu erwartenden Senkungen eingetreten, nach fünf Jahren ist der Endzustand erreicht.

Im Rahmen von Genehmigungsverfahren, aufgrund behördlicher Auflagen und aus Gründen des Umweltschutzes ist es für die DSK von großer Bedeutung, die zu erwartenden Beeinflussungen möglichst genau und sicher zu prognostizieren und die auftretenden Auswirkungen umfassend und regelmäßig zu überwachen. Bergbauliche Vorhaben unterliegen daher entsprechenden Rechtsvorschriften, in denen die Genehmigung und Überwachung der Vorhaben, einschließlich der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) geregelt sind [UVP-G 1990, UVP-V 1990]. Diese Rahmenbedingungen führen zur Notwendigkeit einer Prognose möglicher Auswirkungen und zur Überwachung und Kontrolle des aktuellen Abbaus. Die Primärdatenaufnahme und die Datenaktualisierungen müssen bei DSK derzeit regelmäßig für eine Fläche von rund 1500 km² durchgeführt werden.

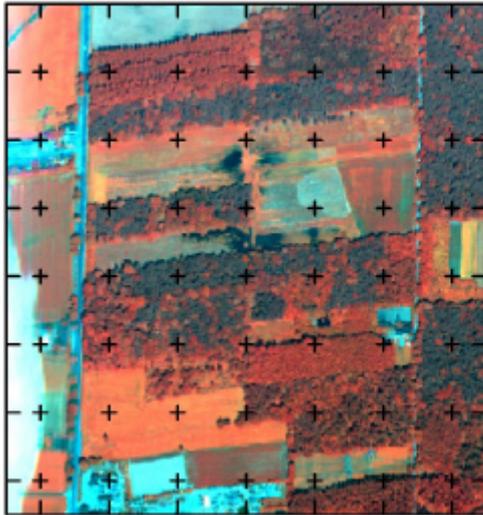
Mit der sog. „Nordwanderung“ folgt der Steinkohlenabbau den Kohle führenden Schichten, aus dem dichtbesiedelten Ruhrgebiet heraus in zunehmend landwirtschaftlich genutzte Regionen. Daraus folgen veränderte Auswirkungen auf die Tagesoberfläche und die Anforderungen an die Aufnahmeverfahren müssen dementsprechend angepaßt werden. Im Ruhrgebiet variiert der Senkungsbetrag zwischen einigen Metern in den älteren südlichen Abbaugebieten und 10 m bis 20 m im Abbaubereich zwischen Emscher und Lippe [WIGGERING 1993].

Neben den offensichtlichen Auswirkungen auf die Infrastruktur, wie z.B. Bauwerke, Verkehrswege oder Leitungssysteme kommt es weiterhin zu Veränderungen hydrologischer und gekoppelter ökologischer Parameter, der ober- und unterirdischen Einzugsgebiete einzelner Vorfluter und deren Geometrie mit den daraus resultierenden Veränderungen der Fließgewässer. Die Auswirkungen auf das Grundwasser führen zu einer flächenhaften Veränderung der Raumlage und Deformation der grundwasserleitenden Schichten und damit zu Veränderungen der Grundwasserscheiden, der Strömungsrichtungen und der Fließgeschwindigkeiten [RÜBER 1997]. Abbildung 1 zeigt mit der Entstehung einer offenen Wasserfläche die Auswirkung des abnehmenden Grundwasserflurabstandes im ländlichen Raum.

Die Erfassung von genauen und aktuellen Daten erfolgte bis Mitte der neunziger Jahre überwiegend durch Verfahren der analytischen Photogrammetrie, der manuellen Luftbildinterpretation und im Rahmen von Felderhebungen. Bei DSK werden sie sogenannten „DGM 1. Stufe“ und „DGM 2. Stufe“ erstellt. „DGM 1.Stufe“, gemessen an analytischen Auswertegeräten, weisen ein 50 m Raster auf, mit entsprechenden Verdichtungsmessungen in sensiblen Bereichen. Über digitale photogrammetrische Verfahren wird ein 5 m Raster abgeleitet. Für die „DGM 2.Stufe“ erfolgt eine Bruchkantenaufnahme und die Einbindung terrestrischer Messungen wie z.B. Bachachsen und Böschungen in nicht einsehbaren Bereichen.

Weiterhin werden „Bodenbewegungsvorausrechnungen“ (BBVB) [WIELAND 1999] verwendet, um die DGM vom Bildflugzeitpunkt auf andere geforderte Zeitstände abzusenken. Diese Modellrechnungen werden mit den Informationen über die Art und Weise des Abbaus und den geologischen Eigenschaften des Gebietes durchgeführt.

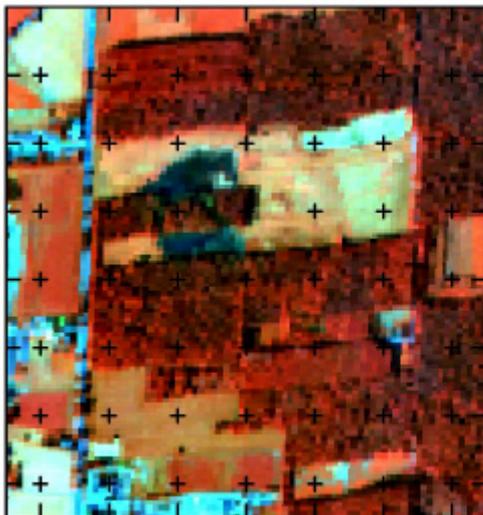
Mit der Perspektive der Verfügbarkeit hochauflösender Erdbeobachtungssatelliten und flugzeuggetragener Sensoren rückt zunehmend die Fernerkundung und die digitale Bildverarbeitung für eine zukünftige, kostengünstige Umweltüberwachung in Bergbaugebieten in den Mittelpunkt des Interesses. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten erfolgte 1997 eine Aufnahme der „Kirchheller Heide“ mit der DPA-Kamera, deren Daten aufgrund eines Hardwarefehlers im INS-System nicht weiter zu verarbeiten waren.



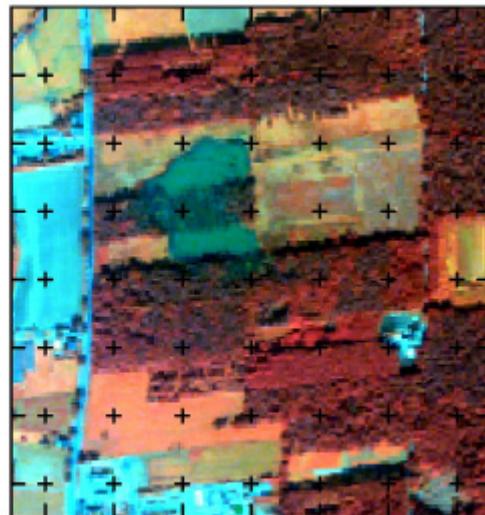
DPA - Juni 1997 (CIR)



HRSC-A - Mai 1998



HyMAP - August 1998 (CIR)



HyMAP - August 2000 (CIR)



Luftbild - April 2001 (RGB)

Abb. 1: Entstehung einer offenen Wasserfläche: Abnahme des Grundwasserflurabstands durch bergbaubedingte Bodenbewegungen.

Abgebildeter Bereich:
650 Meter x 700 Meter.
Gitterkreuzabstand: 100 Meter.

1998 fand eine HRSC-A Befliegung sowie eine kombinierte HRSC-A / HyMAP Aufnahme im Bereich der „Kirchheller Heide“ statt. 1998 wurde eine Laserbefliegung über dem Waldgebiet „Die Haard“ bei Haltern durchgeführt. Teile dieses Gebietes sind 2001 bei einer Radar-Befliegung im X- und P-Band für den Raum Recklinghausen-Haltern erneut erfaßt worden.

Für die Städte Gelsenkirchen, Recklinghausen und Dorsten wurden vertikale Bodenbewegungen über das Verfahren der differentiellen SAR Interferometrie (dInSAR) aus ERS-1/2 Satellitendaten abgeleitet und mit terrestrischen Messungen verglichen.

Die Grundlage für die Vergleiche der jeweiligen Digitalen Gelände- und Höhenmodelle bilden die in Stereo-Luftbildern an analytischen Auswertegeräten gemessenen DGM. Die Paßpunktbestimmung zu den Bildflügen erfolgte dem jeweiligen Stand der Technik entsprechend. Weiterhin werden bei DSK durchgeführte Bodenbewegungsberechnungen und die terrestrischen Meßdaten aus GPS, Tachymetrie, und Nivellement unterstützend zur Bewertung der jeweiligen Datenebenen herangezogen.

2 Satellitengetragene dInSAR – Auswertung

Im FE Projekt „Überwachung bergbaubedingter Bodenbewegungen durch hochauflösende Satellitendaten und flugzeuggetragene Scannerdaten“ [IPI 2001] wurde das Potential der differentiellen SAR Interferometrie zur Erfassung von Bodenbewegungen sichtbar, nachdem die Schweizer Firma Gamma Remote Sensing (*GAMMA*) Interferogramme für den Bereich des gesamten Ruhrgebietes erstellte. Bereits in den ohne zusätzliche Informationen prozessierten Daten waren die trichterförmigen Bewegungsmuster der Phasenzyklen erkennbar.

Zur weiteren kleinräumigen dInSAR-Auswertung wurden geeignete Abbaubereiche und Zeitschnitte bestimmt, für die bei DSK Referenzdaten vorlagen. Von den Auswertungen werden exemplarisch die Ergebnisse für Recklinghausen vorgestellt. Für das Stadtgebiet von Recklinghausen wurden für das Jahr 2000 geeignete ERS-Szenen herausgesucht. Bei DSK erfolgte die Zusammenstellung von entsprechenden digitalen Geländemodellen, Beobachtungslinien und Informationen über die jeweils vorliegende Abbausituation. Als Grundlage zur Erfassung der topographischen Phase liegt ein photogrammetrisches DGM des Bildfluges von 1990 vor.

Vor Abbaubeginn der Bauhöhe 408 im Juli 2000 und abbaubegleitend im Abstand von drei Wochen sind 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 im Rahmen des FE-Projektes durchgeführten GPS-Kampagnen aufgenommen worden. Somit liegen in diesem Falle die Nivellementlinien, Paßpunkte und DGM in einem gemeinsamen Datum vor.

Die Senkungsbeträge der nivellierten Höhen wurden dann, unter Berücksichtigung der Parameter der BBVB, auf das Datum der Satellitenaufnahmezeitpunkte umgerechnet.

Zudem waren im Stadtgebiet von Recklinghausen vier von der Deutschen Montan Technologie (DMT) betriebene GOCA-GPS Stationen installiert [JÄGER E.A. 1999].

Die drei unter Senkungseinfluß stehenden GOCA-Rover-Stationen meldeten ihre relativen Verschiebungen an die als fest angenommene Station auf dem Dach der Markscheiderei des Bergwerkes Blumenthal/Haard. Diese feste Referenzstation wurde im Rahmen der GPS-Messungen sowohl terrestrisch über einen Vorwärtsschnitt eingebunden, als auch an die 20 km entfernte SAPOS Station in Essen angebunden.

In Abbildung 2 sind die Tagesvektoren (17. August 2000 bis 31. Januar 2001) der 3D-Bewegungen einer GOCA-Station dargestellt. Diese Station liegt genau über dem Abbaubereich. Der Betrachter blickt sozusagen aus Richtung des Senkungsschwerpunktes, der Abbau zieht von links nach rechts vorbei.

Die Auswertung der ERS-Daten erfolgte bei GAMMA über die DGM-gestützte dInSAR-Prozessierung. Die Geocodierung der Interferogramme wurde 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. Abbildung 3 zeigt die Überlagerung der dInSAR Senkungen mit den Abbauf lächen und der Lage der Nivellementlinien.

In Abbildung 3 ist zu erkennen, daß der Senkungsschwerpunkt südlich der Bauhöhe 408 verläuft. Der Grund ist, daß Restsenkungen der Bauhöhe BH im Gebirge hängen blieben. Durch den Abbau der nördlich gelegenen Bauhöhe 408 erfolgte die Freisetzung von Restsenkungen, mit der Folge, daß sich die Senkungsbewegungen beider Abbauf lächen überlagern.

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 mit dem dInSAR-Verfahren nicht mehr möglich, die Mehrdeutigkeiten der Phasen so aufzulösen, daß der gesamte Senkungsverlauf repräsentiert werden kann. Jedoch zeigen die Auswertungen ein hohes Potential zur großflächigen Erfassung von Bewegungen im Bereich von wenigen Zentimetern, auch im bebauten Bereich abseits der Beobachtungslinien. Die permanente GOCA-GPS Station befindet sich in der Nähe des Punktes Nr. 20 der in Abbildung 3 präsentierten Nivellementlinie.

Die Stärke einer Kombination von dInSAR- und terrestrischen Verfahren liegt hier also in der flächendeckenden Erfassung kleiner, relativer Bewegungen am sogenannten Nullrand des Einwirkungsbereiches aus Satellitendaten, und der terrestrischen Erfassung absoluter

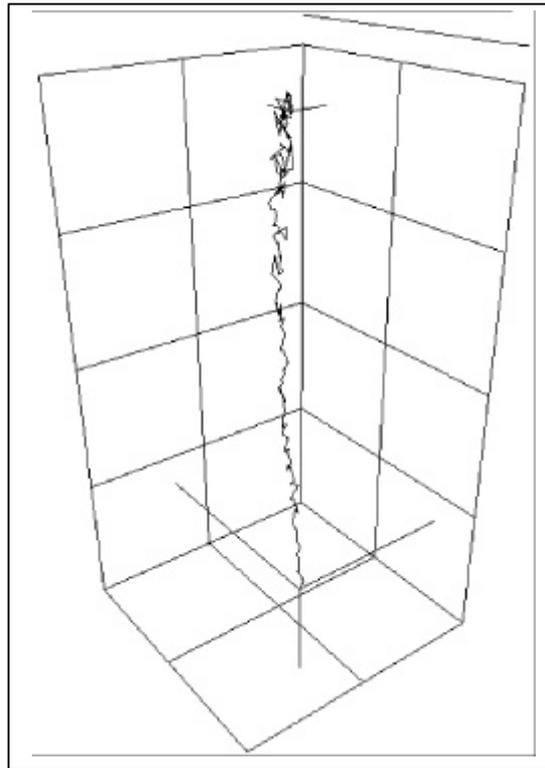


Abb. 2: 3D-Tagesvektoren einer permanent registrierenden GOCA-GPS Station (August 2000 bis Januar 2001). Gittermaschenweite: 5 cm.

Senkungsbeträge auf Beobachtungslinien oder dauerhaft eingerichteten Beobachtungsstationen [SPRECKELS, E.A. 2001].

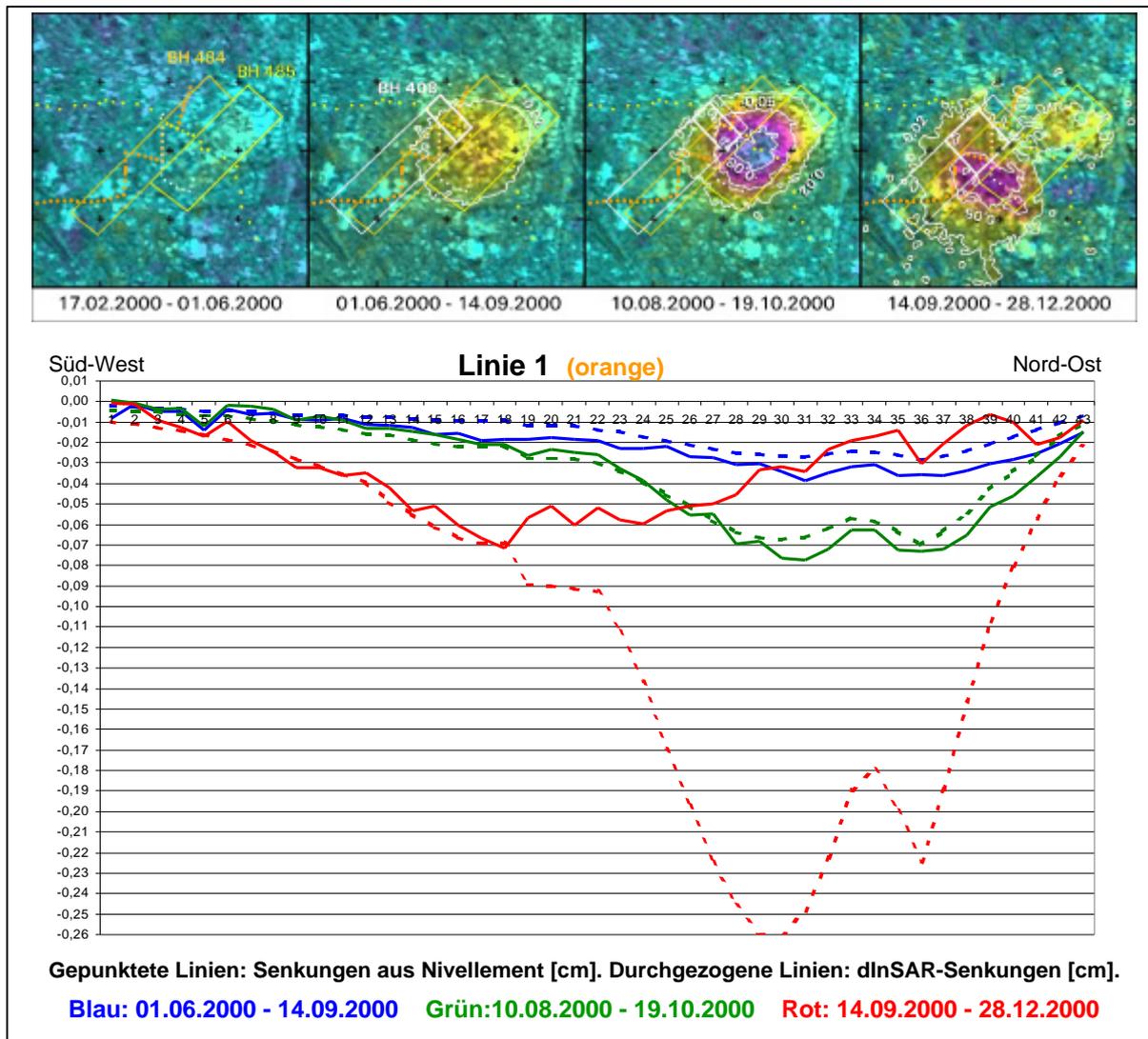


Abbildung 3: Oben: dInSAR Senkungen, ein Farbzyklus entspricht einer vertikalen Bewegung von 12,8 cm. Überlagerung der 2 cm, 5 cm und 8 cm Senkungs-Isolinien. Abbaubereiche: BH 484 (Jan.98-Dez.98); BH 485 (Apr.99-Nov.99); BH 408 (Jul.00-Jul.01). Unten: Vergleich der dInSAR-Senkungen mit Nivellement. Gitterkreuzabstand: 500 m.

Die Abbaubereiche der DSK verlassen mittlerweile die urbanen Regionen, so daß die dInSAR Verfahren mit Daten der ERS-Satelliten wegen der geringen Kohärenz im ländlichen Raum nicht mehr einzusetzen sind. GAMMA führt erste Untersuchungen zur Ableitung von Bodenbewegungen mit L-Band Daten des japanischen JERS Satelliten durch [STROZZI, E.A. 2001]. Die Ergebnisse zeigen die Form der Senkungsmulden und die Ableitung des vollständigen Senkungsbetrages, auch in Waldflächen.

3 Flugzeuggetragene Systeme

3.1 HRSC-A – Aufnahme

Die HRSC-A Aufnahmen fanden im Rahmen des FE Projektes „Nutzung von hochauflösenden Satellitendaten zur großräumigen Überwachung der Umweltauswirkungen bergbaulicher Tätigkeiten im Ruhrgebiet“ statt, das von der DLR unter dem Förderkennzeichen 50EE9652 gefördert wurde [IPI 2000]. Im Mai 1998 wurde ein etwa 12 km² großes Testgebiet aufgezichnet. Die im August 1998 durchgeführte kombinierte HyMAP und HRSC-A Befliegung über 75 km² im Bereich der Kirchheller Heide deckt die Mai Aufnahme vollständig ab.

Beide Aufnahmezeitpunkte sind wegen der fortgeschrittenen Vegetationsphase nicht optimal zur Berechnung von DGM im ländlichen Raum und in Waldgebieten, jedoch erlaubte der Zeitrahmen des Projektes keine weitere Verschiebung in den Herbst bzw. in das nächste Frühjahr. Die DHM und Orthobilder wurden am *DLR - Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung* erstellt [WEWEL, SCHOLTEN 2000].

Zur Geocodierung der HRSC-A Bilder wurden Paßpunkte eines Bildfluges aus dem Jahr 1993 neu signalisiert und per GPS eingemessen. Als Vergleichsgrundlage diente das analytische DGM des Bildfluges aus dem Jahr 1993.

Die Untersuchungen der DHM beider Befliegungen konnte die vom *Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung* angegebene innere Genauigkeit von ± 20 cm bestätigen. Zudem wurde ein 5 Meter GPS-Raster über eine 16000 m² große Vergleichsfläche auf einem Parkplatz gemessen; diese Punkte wurden als Anfahrdatensatz für die Nachmessung in zwei Luftbild-Stereomodellen an einem analytischen Auswertegerät herangezogen, um den Einfluß bergbaubedingter Senkungen zu erfassen. Die so ermittelten Senkungen von 0 cm im Norden des Parkplatzes und 35 cm im Süden konnten über die Höhenmessungen einer nahe gelegenen Nivellementlinie bestätigt werden. Für den Bereich des Parkplatzes liegen die Höhendifferenzen zwischen der GPS-Rastermessung und dem HRSC-A DHM im Bereich von 0 cm bis 15 cm und somit innerhalb der Systemgenauigkeit der Kamera.

Der Vergleich der DHM im ländlichen Raum zeigt den Vegetationswechsel zwischen Mai und August, vor allem den Aufwuchs auf Maisfeldern und abgeerntete Getreidefelder. In den Waldgebieten sind nur die Höhen der Baumkronen abzuleiten. Außerdem zeigt der Vergleich der HRSC-A DHM mit dem DGM'93 die zwischen 1993 und 1998 entstandenen großflächigen Senkungsmulden auf Freiflächen und Wiesen/Weiden an. Im Bereich der Vernässungsfläche (s. Abb. 1) konnte gegenüber der Modellrechnung der BBVB eine um einen Meter größere Senkung festgestellt und anhand der GPS-Messungen bestätigt werden (s. Abb. 4). Diese Differenzen deuten darauf hin, daß für diesen Abbaubereich die Parameter zur Berechnung der Bodenbewegungen (BBVB) überprüft werden müssen.

Die HRSC-A Kamera kann zur großflächigen Erfassung der Tagesoberfläche für Areale mit geringem Vegetationseinfluß herangezogen werden, um Bodenbewegungen zu erfassen. Trotz der Aufnahme und redundanten Auswertung von fünf Stereozeilen zur Höhenberechnung weist auch die HRSC-A Fehlkorrelationen, und bei der Nachbearbeitung der Höhendaten, Fehlinterpolationen auf, die typisch für die Matchingverfahren bildgebender Systeme sind. Diese Effekte entstehen z.B. durch entgegen der Flugrichtung gepflügte Äcker, deren gleichmäßige Struktur zu falschen Korrelationen führen kann. Auch die Erfassung von 10-bit Datensätzen liefert stellenweise in dunklen, kontrastarmen Schattenbereichen un-

genaue oder sogar keine Informationen, was letztendlich zu „No-Data“ Flächen führt, deren Höhen interpoliert wurden. Solche Flächen müssen bei der Bewertung der HRSC-A Höhenmodelle gesondert betrachtet werden.

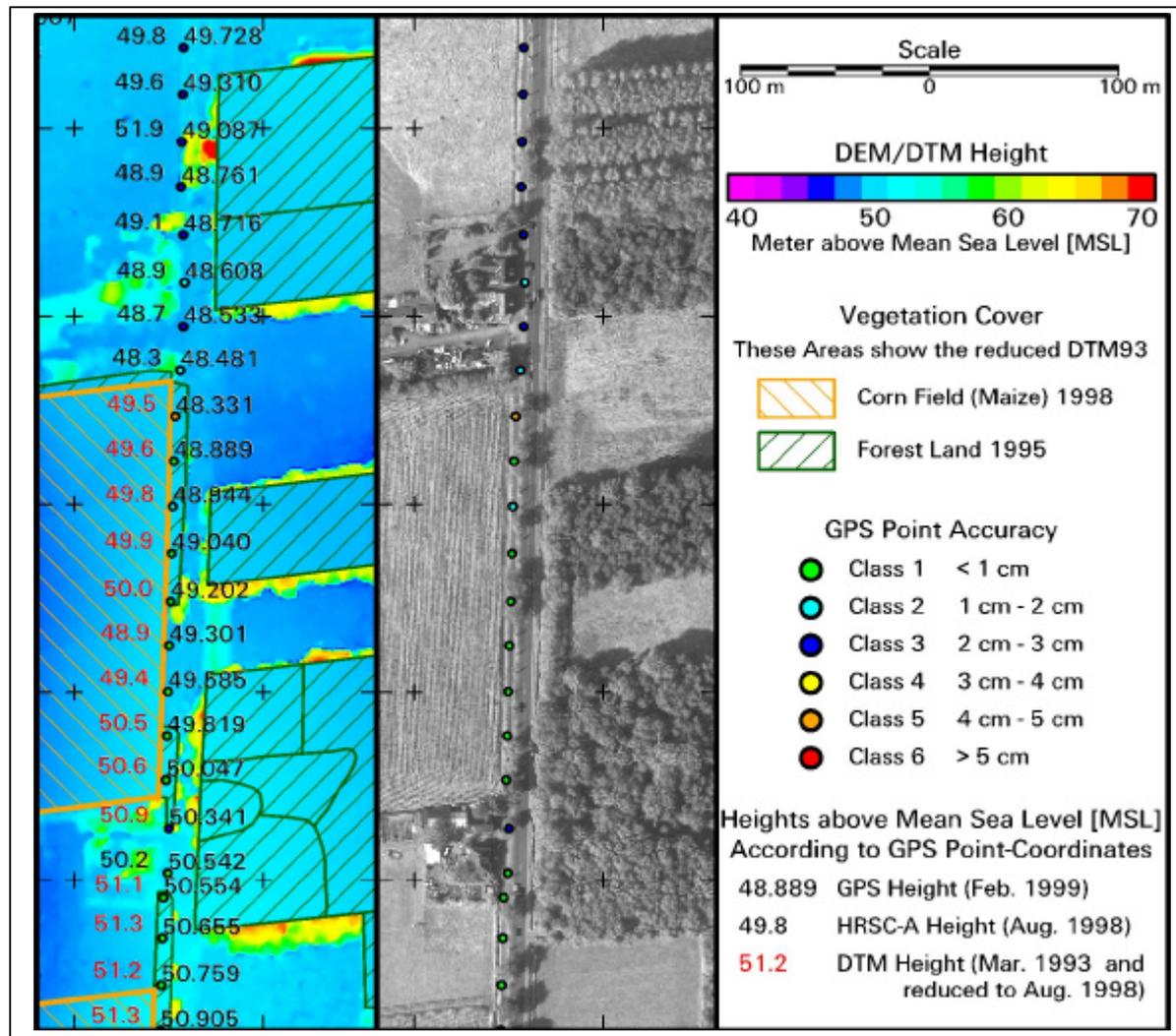


Abbildung 4: Vergleich der Höhen in den GPS-Punkten (links): GPS-Höhen [Angabe auf mm], HRSC-A-DOM'98 [Angabe auf dm] und senkungskorrigiertes DGM'93 [Angabe auf dm, rote Zahlenwerte]; HRSC-A Orthobild mit Lage der GPS-Punkte und deren Genauigkeitsklasse (Mitte); Legende (rechts). (Gitterkreuzabstand: 100 m).

Durch die Ausmaskierung von Vegetationsflächen im HRSC-A DHM und der Verschneidung mit weiteren flächendeckenden Höhendaten konnte eine Beurteilung verschiedener Höhendatensätze erfolgen, die durch weitere Referenzmessungen (Nivellement, GPS) gestützt wurden und eine Bewertung der Bodenbewegungsmodelle gestatteten. Der Befliegungszeitpunkt muß jedoch so wie für die Befliegungen zur Höhenauswertung in Luftbildern gewählt werden: im Frühjahr vor Einsetzen des Pflanzenwachstums, möglichst um die Mittagszeit, um einen geringen Einfluß durch Schattenwurf zu bekommen.

Die digitalen Daten der HRSC-A Kamera sind, ebenso wie die Luftbild DGM der digitalen Photogrammetrie, für ein Bodenbewegungsmonitoring einsetzbar, jedoch muß die Stereo-Visualisierung sowie 3D-Editierfunktionen zur Nachbearbeitung der DGM gegeben sein.

3.2 Laser – Aufnahme

Im Frühjahr 1998 erfolgte die Aufnahme eines etwa 100 km² großen Gebietes mit Laser System der Fa. TopoSys. Den größten Teil dieses Gebietes bildet das Waldgebiet „Die Haard“, weiterhin sind die Auen des Flusses Lippe in der Nähe der Stadt Haltern enthalten. Die umfangreichen Auswertungen zur Genauigkeit dieser Aufnahmen wurden im Jahr 1999 am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI) der Universität Hannover im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt [KOCH 1999].

Die Grundlage dieser Untersuchungen bildete ein photogrammetrisches DGM, das an analytischen Auswertegeräten aus einem Bildflug des Jahres 1996 gemessen wurde.

Die gelieferten DGM und DHM wurden von der Fa. TopoSys überarbeitet und gefiltert geliefert. Auf die Art und Weise der Filterungen sind keine Hinweise vorhanden.

Die Untersuchungen der Laser DHM im Vergleich zu dem photogrammetrischen DGM zeigten einen systematischen Fehleranteil von $dz = \pm 30$ cm. Dieser Betrag wurde allerdings in ähnlicher Höhe auch bei der Untersuchung des Radar DHM im X-Band ermittelt (vgl. Kapitel 3.3). Bei der Einbindung des Laser DGM in das photogrammetrische DGM wurden zudem sehr große Lageabweichungen von -2 m bis zu -3 m im Rechts- und Hochwert festgestellt. (s. Abb. 5, oben links). Diese Abweichungen zeigt auch der Vergleich mit dem Radar-DHM (X-Band) vor allem an Rampen, Böschungen und Deichen (s. Abb. 5, unten rechts).

Die Geocodierung der Laser-Daten erfolgte über dGPS zu zwei im Aufnahmegebiet positionierten Empfängern. Die Lagekontrolle der in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem transformierten Daten wurde über gescannte DGK5 durchgeführt. Die Kontrolle ergab Abweichungen von -2,1 m im Rechts- und -1,3 m im Hochwert und wurden von TopoSys als Korrektur (Offset) angebracht.

Zur Höhenkontrolle wurden Referenzpunkte im Bereich des Bergwerkes Blumenthal/Haard herangezogen, wobei eine mittlere Abweichung von -1,35 m ermittelt und für das gesamte Höhenmodell als Offset berücksichtigt wurde.

Weitere Einflüsse auf die Genauigkeit der DGM im ländlichen Raum sind nach [KOCH 1999] der bodennahen Vegetation zuzuschreiben, für Waldgebiete wird zwar der „Last Pulse“ stärker gewichtet, allerdings ist auch hier das DGM höher als die tatsächliche Oberfläche.

Um die Laser-Höhenmodelle für die geforderten Genauigkeiten eines Bodenbewegungs- und Umweltmonitoring einsetzen zu können, bedarf es auch hier der Nachbearbeitung der Datensätze, wobei ein zeitgleich aufgenommener Bilddatensatz und die Möglichkeit zur Stereo-Visualisierung und -Editierung vorhanden sein müssen.

3.3 Radar Aufnahmen: AeroSensing AeS-1 X- und P-Band

Die günstigsten Voraussetzungen zur Ableitung von Digitalen Geländemodellen mit optischen Systemen besteht im Frühjahr vor dem Einsetzen des Pflanzenwachstums, jedoch ist in diesen Wochen mit wenigen Tagen zu rechnen, an denen optimale Bildflugverhältnisse herrschen.

Aus diesem Grunde wird im FE Projekt „Überwachung bergbaubedingter Bodenbewegungen (MONS)“ der DSK der Einsatz aktiver Radarsysteme zur großflächigen

Ableitung von DGM und DHM untersucht. Im April 2001 erfolgte die Aufnahme eines etwa 100 km² großen Gebietes zwischen Recklinghausen und Haltern mit dem AeroSensing AeS-1 System, im X-Band [cm] und im P-Band [dm].

Die Wellenlänge des X-Bandes im cm-Bereich ermöglicht die Ableitung hochauflösender Oberflächen-DHM und enthält somit die Höhen der Vegetation und von Bauwerken. Das DHM hat eine Bodenauflösung von 2,5 m, die Angabe zur Höhengenaugigkeit beträgt $\pm 0,2$ m. Das P-Band hat eine Wellenlänge im dm-Bereich und kann somit Geländerauhigkeiten kleiner etwa 70 cm nicht mehr erfassen. Es gab Hinweise darauf, daß Vernässungsflächen in Waldgebieten über die Bodenfeuchte erfaßt und zur Detektion und Dokumentation eines ansteigenden Grundwasserspiegels (s. Abb.1) dienen könnten [THIEL, E.A. 2001]. Das DGM wurde mit 2,5 m Bodenauflösung geliefert, die Höhengenaugigkeit ist mit ± 1 m angegeben. Zu beiden Höhenmodellen wurden die Amplituden-Orthobilder erstellt und mitgeliefert.

Die Wetterbedingungen zum Zeitpunkt der Befliegung waren äußerst ungünstig und fanden bei stürmischem Wind und schnell wechselnden Regenfronten statt. Die Geocodierung erfolgte über einen Referenzbildstreifen, der die Lage von 10 Corner-Reflektoren wiedergibt. Die Koordinaten der Corner-Reflektoren wurden zu einer temporären GPS-Referenzstation im Aufnahmegebiet bestimmt, die während der gesamten Befliegung auf einem Paßpunkt des Bildfluges aus dem Jahr 1996 stand. Des weiteren stand während der Befliegungen ein GPS Empfänger auf einem Gebäude des Flugplatzes Dortmund. Die GPS-Empfänger wurden außerdem an die SAPOS-Stationen Essen, Dortmund und Coesfeld angeschlossen.

Die Radar-Daten wurden bei der Fa. AeroSensing prozessiert und sind ungefiltert ausgeliefert worden.

Der nördliche Bereich des aufgezeichneten Gebietes deckt auch einen Teil des Laser-DHM 1998 ab. Zur Bewertung der AeS-1 Daten konnte für den nördlichen Bereich der Lippe und den westlichen Ausläufern des Waldgebietes „Die Haard“ auf eine Biotoptypenklassifizierung zum UVS Gebiet des Bergwerkes Auguste/Viktoria aus dem Jahr 1999 zurückgegriffen werden.

Da die Radar Höhenmodelle ungefiltert geliefert wurden, erfolgte für das X-Band eine geringfügige Nachbearbeitung, mit maximalen Filtergrößen von 3 Pixel, um nur den Einfluß der Störpixel zu minimieren.

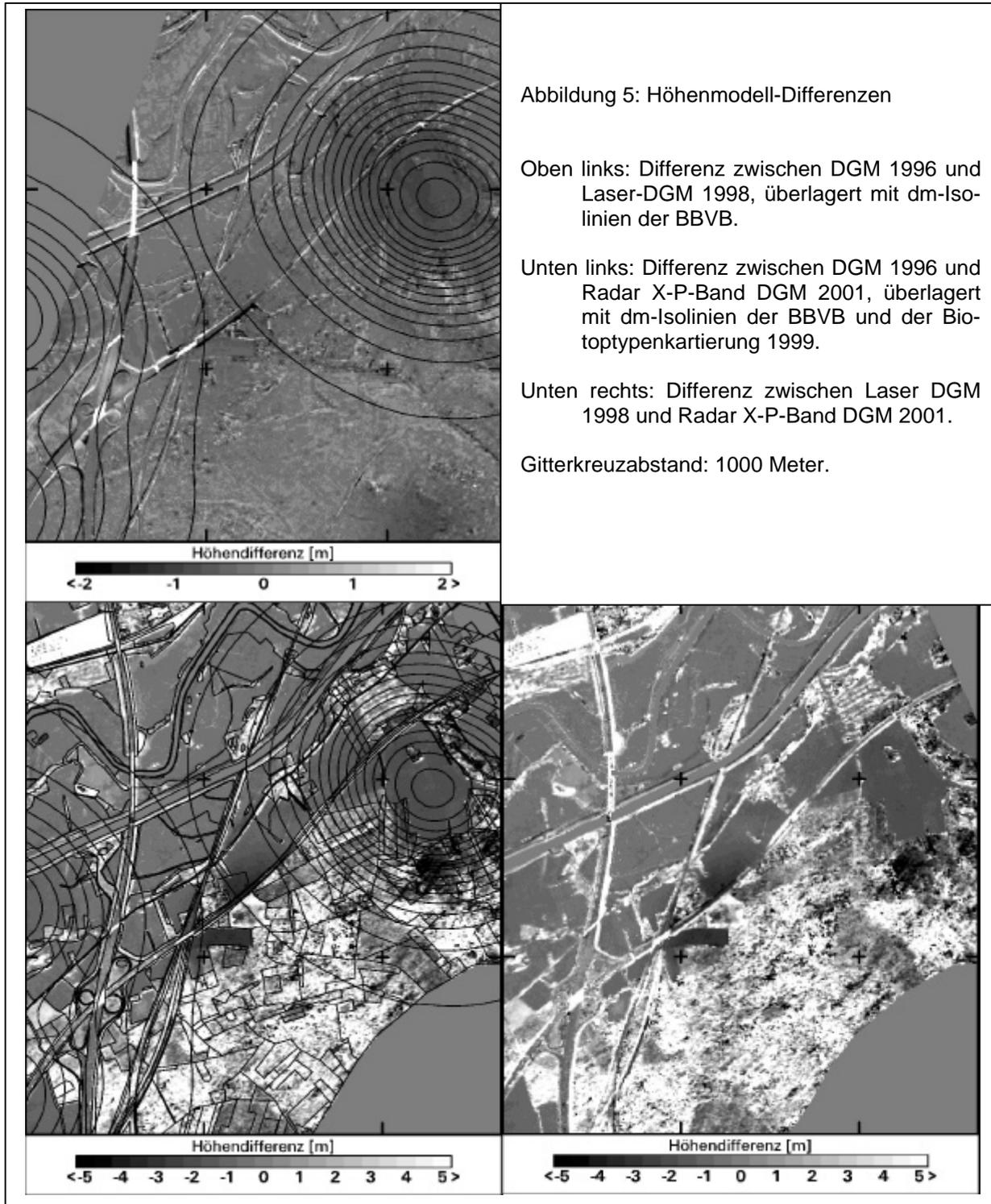
Die P-Band Daten weisen große „No-Data“ Bereiche im Bereich der Lippe Auen auf, wo wegen des gering bewegten Geländes für Weiden und Ackerflächen, Landwirtschafts- und Industriebrachen, sowie der hohen Wasserstufe und Bodenfeuchte für Weiden und Ackerflächen, Birken-, Pappel-, Fichten-, Eichen- und Buchenhaine keine Rückstreuung erfolgte.

Zur weiteren Bearbeitung der P-Band Höhen wurden die Amplitudeninformation verwendet und „No-Data“ Bereiche in den Waldgebieten über Minority-Filterung mit Höheninformation aus den Randbereichen aufgefüllt.

Aus den Daten der Biotoptypenkartierung wurden verschiedene Layer herausgenommen, um Masken für z.B. Baum/Wald, Weide/Wiese und Gewässer zu erstellen. Somit wurde aus der Kombination von X- und P-Band ein neues Geländemodell erstellt, welches in den Waldbereichen nun die Höheninformation des P-Band enthält. Dieses Höhenmodell wurde für die weiteren Auswertungen herangezogen.

Der Vergleich des Radar-DGM mit dem photogrammetrischen DGM aus dem Jahr 1996 zeigt eine gute geometrische Übereinstimmung z.B. an Böschungen und Rampen, wobei der Vorteil der Verwendung von im Datensatz sichtbaren Signalen erkennbar ist, hier also Corner-Reflektoren. Weiterhin sind auf den ersten Blick bereits die Gebiete zu erkennen, die

unter dem Einfluß von bergbaubedingten Senkungen liegen (s. Abb. 5, unten links). Der Vergleich zu dem Laser DGM (s. Abb. 5, unten rechts) zeigt ähnliche Differenzen an Böschungen, Deichen und Rampen wie das photogrammetrische DGM, so daß dieser Lagefehler tatsächlich in den Laser-DGM enthalten ist und über die Anpassung an die Geometrie der DGK5 entstand.



Die Bewertung der P-Band Daten liefert mehrere Einflußgrößen. „No-Data“-Flächen sind im nördlichen Bereich entlang der Lippe hauptsächlich der hohen Bodenfeuchte zuzuordnen. In den höher gelegenen südlichen Bereichen nahe Recklinghausen kommen, verglichen mit den X-Band Höhen, ähnliche Höhenwerte auf Ackerflächen vor, während Wiesen und Weiden keine Rückstreuung im P-Band erzeugen.

In Waldgebieten ist hauptsächlich die Dichte von Ästen und Zweigen sowie die Dichte des Bestandes als Maß für die Höhenzuordnung auszumachen. Die P-Band Daten liegen auf Lichtungen und in lockeren Baumbeständen tiefer als das photogrammetrische DGM (Laubmischwald, Lärchen-, Kiefer-, Birke- Eichenwald) und höher in dicht stehenden Eichen-, Birken-, Kiefern-, Fichtenwäldern. So liegt, im Vergleich zum photogrammetrischen DGM, die P-Band Höhe auf Lichtungen 2 dm bis 5 dm (max. 1,5 m) tiefer, bei dichten Nadelbaumbeständen jedoch um 6 m bis 10 m höher – wobei hier angemerkt werden muß, daß dichte Nadelwaldbestände auch im Stereoluftbild nicht auszuwerten sind. Die Vegetation hat auch einen großen Einfluß auf die Laser DHM [KOCH 1999].

Es kommen im Bereich des Waldes „Die Haard“ drei kleinere, baumumstandene Teiche vor, die im P-Band nicht als „Wasser“ bzw. „No-Data“ Fläche erkennbar sind. Eine eindeutige Aussage über die Erkennung von Vernässungsflächen durch die Vegetation hindurch kann für diese kleinen Flächen nicht erfolgen.

Die Untersuchung der Radar Höhenmodelle zeigt wiederum, daß die DGM nicht die Erdoberfläche repräsentieren und in einer Nachbearbeitung korrigiert werden müssen. Auch hier ist für die Zwecke eines Bodenbewegungsmonitorings ein Stereo-Bilddatensatz von hoher Auflösung mit der Möglichkeit der Editierung der Höhenmodelle nötig. Zwar wird bei dem AeS System je ein Bilddatensatz der Amplitudeninformation geliefert, allerdings sind Auflösung und Kontrast für eine Detailerkennung - jedenfalls im Rahmen der Aufgaben eines Bodenbewegungsmonitorings - nicht ausreichend.

4 Datenaufnahme und Bezugssysteme

Die Vergleiche der DGM ergeben für den Bereich des Bildfluges aus dem Jahr 1996, in den Auswertungen der Laser- und der Radar-DGM, einen Offset von ca. -30 cm.

Unabhängig von den DGM-Auswertungen wurde bei der GPS Kampagne Mai 2001 im Raum Dorsten ebenfalls ein Höhenoffset von -31cm festgestellt. Diese GPS-Kampagne fand im Verbund mit der GPS-Messung in Recklinghausen statt. Das Gebiet zwischen Dorsten im Westen und Haltern im Osten, nördlich von Recklinghausen gelegen, ist im Jahr 1996 im Bildflug „Lippe96“ aufgenommen worden. Im Jahr 1997 wurde der Bereich um Recklinghausen im Bildflug „EmscherMulde97“ beflogen. Die Paßpunktbestimmung wurde 1996 und 1997 von DSK vergeben und erfolgte per GPS.

Die signalisierten Paßpunkte beider Befliegungen sind größtenteils noch erhalten und wurden im November 2000 und Mai 2001 erneut aufgemessen. Im November 2000 wurde im Rahmen des FE-Projektes nur in der Region von Recklinghausen gemessen, wobei ein Empfänger auf dem Dach der Markscheiderei des Bergwerkes Blumenthal/Haard als temporäre Referenzstation diente. Im Mai 2001 wurde dieser Punkt erneut aufgebaut, und damit die Neumessung im Bereich Dorsten angebunden werden konnte, wurde eine temporäre Referenzstation auf der Kohlenwäsche des Bergwerkes Lippe in Dorsten zeitgleich mit der Station in Recklinghausen registriert.

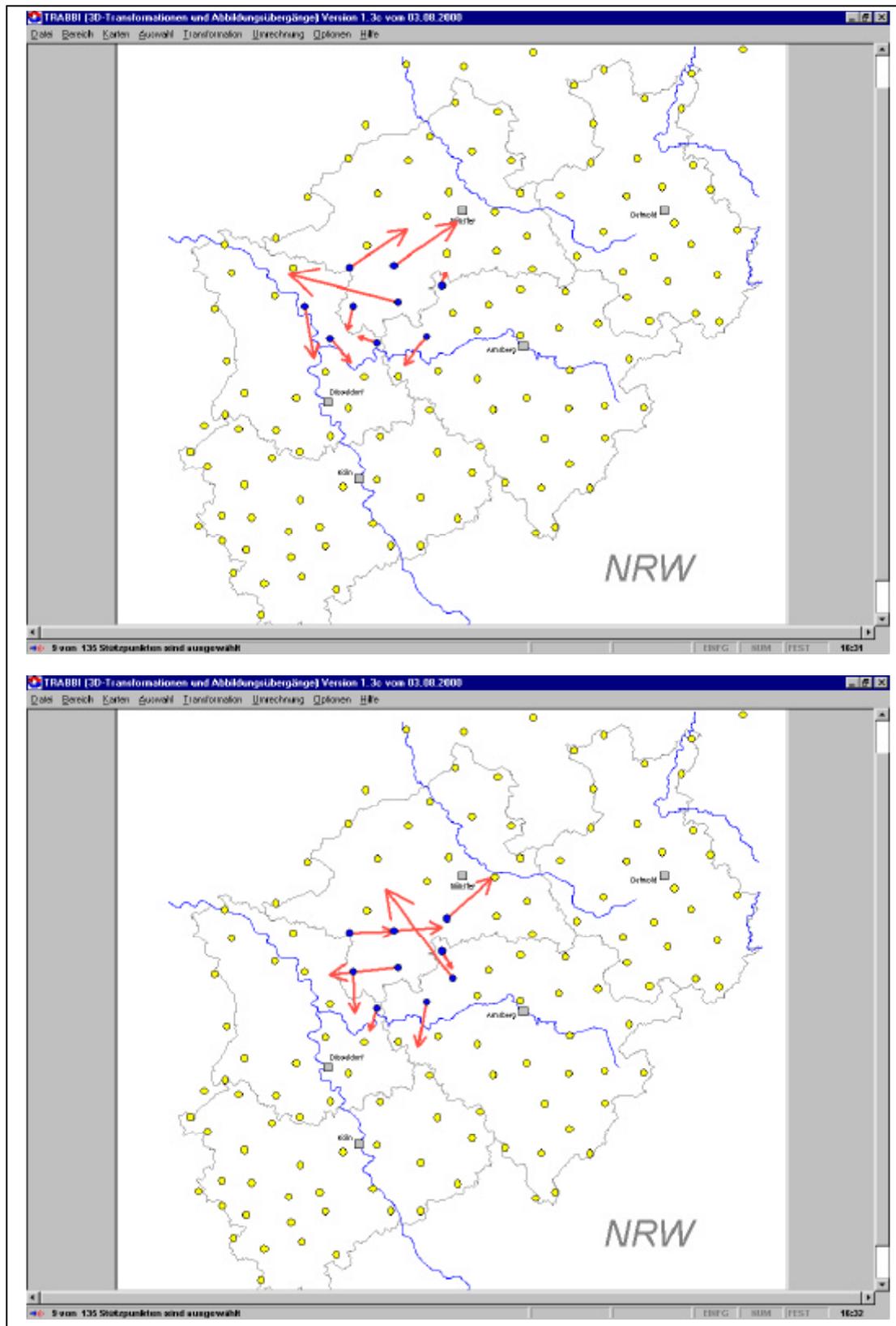


Abbildung 6: Restklaffungen aus dem Transformationsprogramm „TrAbbi“ in jeweils neun DREF Punkten bei der Transformation vom ETRS89 in das Netz'77, z.B. für die Bildflüge 1996 (oben) und 1997 (unten).

Die Transformationen beider Gebiete in das Gauß-Krüger Koordinatensystem über die globalen Transformationsparameter ergaben große Differenzen in den Paßpunktkoordinaten.

Die Recherche ergab, daß die Paßpunktmessungen 1996 und 1997 an jeweils unterschiedliche Trigonometrische Punkte (TP) der „Preußischen Landesaufnahme“ gehängt wurden. Da die Restklaffungen der TP bis zu 21 cm betragen, entstanden zwei lokale Systeme mit stark unterschiedlichen Transformationsparametern, die untereinander Abweichungen von ca. -10 cm (Rechtswert), 3 cm (Hochwert) und in der Höhe von -31 cm aufweisen.

Abbildung 6 zeigt zur Veranschaulichung zwei Bilder mit den DREF Punkten aus dem Transformationsprogramm „TrAbbi“ der Landesvermessung Nordrhein-Westfalen [LVA-NRW 2000]. Beide Bilder zeigen die Restklaffungen der DREF Punkte beim Datumsübergang vom ETRS89 zum Netz'77. Es wurden jeweils neun Punkte ausgewählt, die beispielhaft das Gebiet der 1996 Befliegung (oben) und der 1997 Befliegung (unten) einrahmen.

Als Folge dieser so unterschiedlichen lokalen Systeme wird der Vergleich der Höhenmodelle erschwert. Die DGM „Lippe96“ und „EmscherMulde97“ sind über GPS Punkte eingemessen worden, aber jedes DGM liegt in einem eigenen lokalen Bezugssystem, während die GPS-Nachmessungen, die Laser- und Radar-DHM über SAPOS-Stationen in das GK-System überführt wurden.

Bei der Betrachtung der HRSC-A Höhenmodelle trat dieses Problem nicht auf, da sowohl das Referenz-DGM aus dem Jahr 1993 und die Bilddatensätze der HRSC-A auf identische Paßpunkte bezogen und somit über identische Transformationsparameter in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem übertragen wurden.

Um die DGM untereinander vergleichbar machen zu können, sollten nachfolgend alle Aufnahmen und Auswertungen einheitlich in einem geozentrischen Bezugssystem erfolgen. Diese Daten könnten dann im Nachhinein in das jeweils geforderte Koordinatensystem eingepaßt werden.

5 Zusammenfassung

Bei dem Vergleich der vorliegenden DGM und DHM wurde deutlich, wie wichtig die Kenntnis über die Art und Weise der zugrunde liegenden Referenzmessungen und Bezugssysteme ist, um einheitliche, vergleichbare Datensätze zu erhalten.

Bislang werden die genauesten DGM über die Messung in den Luftbildern an analytischen photogrammetrischen Auswertegeräten erzeugt, was jedoch mit einem hohen Zeit- und Personalaufwand verbunden ist.

Die untersuchten digitalen Aufnahmesysteme und Auswerteverfahren weisen einerseits das Potential zur Erfassung von relativen Bodenbewegungen und andererseits zur Ableitung von Höhenmodellen auf. Die Auswertungen haben ergeben, daß reine Bodenbewegungen vor allem über die Aufnahmen von Radar-Satelliten erfaßt werden können. Die dInSAR Verfahren mit den Daten der ERS Satelliten können relative Bewegungen im cm-Bereich in städtischen Regionen aufzeigen. Senkungen im ländlichen Raum können mit dInSAR-Verfahren über Satellitendaten im L-Band erfaßt werden, jedoch werden diese Daten erst mit dem japanischen ALOS - PALSAR System, voraussichtlich im Jahr 2003, verfügbar sein. Erste dInSAR Auswertungen von L-Band Daten des JERS-Satelliten sind vielversprechend.

Die Kenntnis der großflächigen räumlichen Ausprägung von Senkungsmulden und die Lage des „Nullrandes“ bei Bodenbewegungen können zur Ableitung aktueller Parameter für die Prognosen dienen.

Flugzeuggetragene Sensoren haben das Potential zur Generierung großflächiger digitaler Höhenmodelle und können, allerdings mit Einschränkungen, bei der Ableitung der „DGM 1. Stufe“ verwendet werden. Bisher gibt es kein System, das von der Vegetation unbeeinflusst bleibt. Laser DHM können durch den steilen Blickwinkel und der Registrierung des „Last-Pulse“ in Waldgebieten annehmbare Genauigkeiten liefern.

DHM aus Daten digitaler optischer Kameras enthalten den vollen Vegetationseinfluß, es gibt hier aber einen Bilddatensatz, der eine gute Nachbearbeitung der DHM gestattet, wenn die Möglichkeit zur 3D-Visualisierung und -Editierung gegeben ist.

Der Einsatz von digitalen Kameras und der Laser-Systeme ist stark von den Wetterbedingungen abhängig, wohingegen die Radar-Systeme wetterunabhängig eingesetzt werden können. Die X-Band Daten enthalten den vollen Einfluß der Vegetation, P-Band Daten sind stark von der Bodenfeuchte und der Vegetationsdichte beeinflusst.

Laser- und Radar-Systeme liefern keine bzw. keine direkten Bilddatensätze, die eine Nachbearbeitung und die Korrektur auf den bei DSK benötigten Genauigkeitsbereich erlauben. Eine Kombination mit optischen digitalen Sensoren würde eine sinnvolle Ergänzung bedeuten, um große Flächen im Rahmen eines Bodenbewegungsmonitorings schnell und im geforderten Genauigkeitsrahmen erstellen zu können.

6 Literatur

IPI (2000): 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, unveröffentlicht.

IPI (2001): INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND INGENIEURVERMESSUNGEN, UNIVERSITÄT HANNOVER: Statusbericht zum Forschungsvorhaben „Überwachung bergbaubedingter Bodenbewegungen durch hochauflösende Satellitendaten und flugzeuggetragene Scannerdaten“. FuE-Vorhaben 0885000 der Deutschen Steinkohle AG.

SPRECKELS, V.; JACOBSEN, K., Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Universität Hannover, 2001, unveröffentlicht.

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.

KOCH, A. (1999): Analyse und Aufbereitung von Laser-Scanner-Aufnahmen. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover, 1999, unveröffentlicht.

- LVA-NRW (2000): TRABBI 3D-Transformationen und Abbildungsübergänge, auf CD-ROM. Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 2000.
- RÜBER, O. (1997): Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung zur Beurteilung von bergsenkungsbedingten Veränderungen der Grundwassersituation im Bereich der Kirchheller Heide. In: COLDEWEY, W. G. UND LÖHNERT, E. P. (Hrsg.): Grundwasser im Ruhrgebiet. Köln, S. 243 - 248.
- SPRECKELS, V.; WEGMÜLLER, U.; STROZZI, T.; MUSIEDLAK, J.; WICHLACZ, H.-C. (2001): Nutzung von InSAR-Daten zur großflächigen Erfassung von topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK). In: Tagungsband des Deutschen Markscheider Vereins (DMV) 2001, Trier, 26. - 28. Sept. 2001, S. 49 - 70.
- STROZZI, T.; WEGMÜLLER, U.; WERNER, C.; WIESMANN, A. (2001): JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring. In: 3rd International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield, UK, 11. - 14. September 2001.
- THIEL, C.; GRUENLER, S.; HEROLD, M.; HOCHSCHILD, V.; JAEGER, G.; HELLMANN, M. (2001): Interpretation and Analysis of Polarimetric L-Band E-SAR-Data for the Derivation of Hydrologic Land Surface Parameters. In: Proceedings of the International Remote Sensing and Geoscience Symposium (IGARSS), Sydney, Australien, Juli 2001, auf CD-ROM.
- UVP-G (1990): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Vom 12. Februar 1990 (BGBl. I S. 205), zuletzt geändert durch Gesetz von 18. August 1997 (BGBl. I S. 2081).
- UVP-V (1990): Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau). Vom 13. Juli 1990 (BGBl. I S.1420), geändert durch Verordnung vom 10. August 1998 (BGBl. I S. 2093).
- WEWEL, F.; SCHOLTEN, F. (2000): Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen mit dem Mehrzeilen-Stereo-Scanner HRSC-A. In: Veröffentlichungen der DGPF-Jahrestagungen, 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 13. - 15. Okt. 1999, U-GH Essen, S. 57 - 66.
- 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.
- WIGGERING, H. (1993): Bergbaufolgelandschaft Ruhrgebiet: Geologische Ansätze zur Einschränkung der Auswirkungen des Steinkohlenbergbaus. In: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Hannover, S. 295 - 307.