

Weltraummethoden revolutionieren Erdbeobachtung

Jürgen Müller, Christian Heipke, Hansjörg Kutterer, Günter Seeber, Monika Sester

Zusammenfassung

Die Geodäsie beschäftigt sich seit mehr als 3000 Jahren mit der Bestimmung der Erdfigur, wobei sich die Betrachtungsweise auf die Erde als Ganzes oder auf Teile von ihr erstreckt, das heißt diese reicht vom besseren Verständnis globaler dynamischer Prozesse bis hin zu ingenieur-geodätischen Überwachungsmessungen.

Die Messverfahren unterliegen einem stetigen Wandel. Durch Entwicklung und Anwendung von Weltraumverfahren ist in den vergangenen Jahrzehnten ein Umbruch von der klassischen Vermessung zur modernen Erdbeobachtung eingetreten, zu dem die Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover wesentlich beigetragen hat. Zur Erfassung der Dynamik der Erde werden u. a. Lasermessungen zum Mond, zur präzisen Bestimmung des Schwerefeldes speziell ausgerichtete Satellitenmissionen, wie GRACE und GOCE, genutzt. Mithilfe des Positionierungssystems GPS (künftig Galileo) und anderer geodätischer Raumverfahren wurden hochpräzise globale und regionale Überwachungsnetze aufgebaut, die es ermöglichen, kontinentale Plattenbewegungen genauso zu bestimmen wie Deformationen von Ingenieurbauwerken. Fernerkundungssensoren, wie die Metric Camera, MOMS-02/D2, ERS und ENVISAT, ermöglichen die multi-spektrale, dreidimensionale Beobachtung der Erdoberfläche und tragen auch wesentlich zum umfassenden Umwelt-Monitoring bei. Entscheidend bei allen diesen Anwendungen ist ein geeignetes Datenmanagement, das über speziell entwickelte Geoinformationssysteme realisiert wird. Automatische Methoden zur Integration, Analyse, Interpretation, visuellen Aufbereitung und Kommunikation räumlicher Daten werden immer relevanter, um die Fülle von heute verfügbaren Daten überhaupt in sinnvoller Weise nutzen zu können. Hierzu werden in der Geoinformatikforschung Methoden entwickelt. Dabei spielt die Interdisziplinarität zwischen Geodäsie und Informatik eine immer stärkere Rolle. Schließlich ist die Qualitätsbeurteilung der komplexen Daten und abgeleiteten Ergebnisse von großer Bedeutung, wofür geeignete Methoden entwickelt wurden.

In diesem Beitrag werden exemplarisch wissenschaftliche Entwicklungen an der Universität Hannover gezeigt, vor allem aber aktuelle Forschungsaktivitäten in den diversen Fachgebieten der Geodäsie und Geoinformatik.

1 Historischer Kontext

Nach Helmert (1880) ist die Geodäsie die Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche. Die Geodäsie hat ihre Ursprünge in der Astronomie und Geometrie. Die Anfänge – nach ersten Ansätzen in den alten Stromkulturen – finden sich im alten Griechenland, wo Untersuchungen zur Dreiecksberechnung und zur Bestimmung geometrischer Figuren mit einfachen Methoden stattfanden. Von Eratosthenes stammt eine der ersten Berechnungen des Erdradius (Bialas 1982).

Über viele Jahrhunderte stagnierte die Weiterentwicklung in Europa, bis in der frühen Neuzeit der Wissens- und Forscherdrang neu auflebte. Neben wissenschaftlichen Fragestellungen war der Wunsch der Herrschenden nach geeigneter Umsetzung von Besteuerungsmaßen, also der Kenntnis der Größe und Eigentumsverhältnisse von Grundstücken, wesentliche Triebfeder. Die Vermessung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken (z.B. Kanälen) bildete eine weitere Komponente. Die Forderung nach einer einheitlichen Kartengrundlage, auch für militärische Zwecke, führte schließlich zur staatlich hoheitlichen Vermessung mit den notwendigen behördlichen Strukturen, zuständig für Grundlagennetze für Lage, Höhe und (später) Schwere. Zentrale Messgrößen waren Winkelmessungen, Streckenmessungen (um einen Maßstab zu etablieren) und astronomische Beobachtungen, die u.a. der Lagerung und Festlegung der Netze dienten. Umfangreiche Berechnungen waren notwendig, um die Beobachtungsgrößen in das gewünschte Koordinatensystem zu bringen (z.B. Grossmann 1976); dezidierte Verfahren zur Auswertung, Datenprozessierung und Qualitätsbeurteilung wurden entwickelt. Im letzten Jahrhundert erweiterten sich die Fragestellungen im Vermessungswesen von nationalen zu globalen Aufgaben, was vielfältige internationale Kooperationen mit sich brachte (Torge 2003). Mit der Satellitengeodäsie und den Entwicklungen in der elektronischen Datenverarbeitung trat das Vermessungswesen in eine neue Epoche ein - heute auch dokumentiert durch den neuen Namen Geodäsie und Geoinformatik -, die nicht nur schnelle Untersuchungen auf vielfältigen räumlichen und zeitlichen Skalen im System Erde, sondern weitere Arbeitsbereiche in der Datenverwaltung und –aufbereitung sowie Visualisierung mit sich brachte.

2 Geodätische Weltraumverfahren und Satellitenmissionen

Zu den Kernaufgaben der Geodäsie zählen unter anderem die Bestimmung (a) der Figur der Erde, also der physischen Oberfläche und ihrer Veränderungen, (b) der Variation in der

Orientierung und Rotation der Erde sowie (c) des Erdschwerefeldes und seiner zeitlich variablen Anteile. Die Verbindung zwischen den drei Bereichen stellen geeignete Koordinatensysteme dar, in denen die Berechnungen durchgeführt werden. Die Bestimmung dieser globalen Zielgrößen war und ist mit lokalen trigonometrischen, gravimetrischen und astronomischen Methoden nur sehr eingeschränkt möglich. Die Nutzung von Satellitenmethoden, geodätischen Weltraumverfahren und Schwerefeldsatellitenmissionen änderte die Situation grundlegend und eröffneten zugleich weitere Betätigungsfelder für die Geodäsie.

Mit den geodätischen Raumverfahren VLBI (Very Long Baseline Interferometry), GPS (Global Positioning System), SLR/LLR (Satellite/Lunar Laser Ranging) werden globale erdfeste, mit VLBI auch raumfeste, Referenzsysteme mit Zentimetergenauigkeit realisiert. Sie liefern den Rahmen für regionale Verdichtungen und für vielfältige Anwendungen in der Navigation und Positionierung (siehe auch Abschnitte 4 und 5). Aufgrund der hohen Genauigkeit spielt heute auch die Überwachung der zeitlichen Veränderungen der Erdfigur eine wichtige Rolle. Das geplante europäische Satellitennavigationssystem Galileo wird zu einer weiteren Verbesserung und größeren Zuverlässigkeit der abgeleiteten Ergebnisse führen. Mit Radarabstandsmessungen der Meeresoberfläche aus Satellitenhöhe (Altimetrie) erhält man die globale Meeresoberfläche und kann deren Variationen (z.B. durch Meeresströmungen) studieren.

Erdrotationsgrößen, wie die Tageslängenschwankung oder die Polbewegung, können ebenfalls mit hoher Genauigkeit aus den geodätischen Raumverfahren bestimmt werden. Diese Erdrotationsschwankungen werden von Massenvariationen (z.B. im Ozean, Atmosphäre, Kontinentalwasser oder der festen Erde) oder von Relativbewegungen (z.B. durch Winde) verursacht, so dass man aus der Analyse von Zeitreihen solcher Schwankungen auf die ursächlichen dynamischen Prozesse schließen kann.

Mit den Raumverfahren können aber auch weitere Effekte untersucht werden. So wurde am Institut für Erdmessung (IfE) aus der Analyse von Lasermessungen zum Mond der letzten 35 Jahre eine Reihe von relativistischen Parametern zum Test der Einsteinschen Gravitationstheorie bestimmt (Abb. 2.1). Erwähnenswert sind z.B. eine mögliche zeitliche Variation der Gravitationskonstanten, Tests des Äquivalenzprinzips (ob z.B. alle Körper in gleichem Maße gravitativ beschleunigt werden) und Parameter, die mit der Krümmung der Raumzeit zusammenhängen (Müller et al. 2005b).

Ein weiterer Arbeitsbereich der Geodäsie betrifft die Bestimmung des Schwerefeldes der Erde und damit zusammenhängend die Berechnung einer physikalischen

Höhenbezugsfläche, das sogenannte Geoid. Am IfE besteht eine lange Tradition in der Erfassung terrestrischer Schwerewerte, z.B. mit dem Absolutgravimeter FG5 (Abb. 2.2), sowie der präzisen regionalen Geoidbestimmung aus gravimetrischen Daten. Seit einigen Jahren wurden spezielle Satellitenmissionen (CHAMP¹ und GRACE, Abb. 2.3; für 2006 ist GOCE geplant) gestartet, die global mit hoher konsistenter Genauigkeit das statische Erdschwerefeld und dessen zeitliche Variation erfassen sollen. Der Betrieb und die Auswertung dieser Missionen werden auf der Basis internationaler Kooperationen organisiert. Das IfE ist stark in die Kalibrierung und Validierung der Satellitendaten durch Vergleich mit terrestrischen Daten involviert (Jarecki et al. 2005). So wird die fennoskandische Landhebung in Kooperation mit skandinavischen Partnern in umfangreichen Absolutgravimeter-Kampagnen bestimmt, um unabhängige Vergleichswerte für die GRACE-Messungen zu liefern (Müller et al. 2005a). Durch Kombination von Satelliten- und terrestrischen Daten werden darüber hinaus die regionalen Geoidmodelle verbessert (Denker et al. 2005).

Aus den Schwerefeldvariationen, die auf Massenvariationen ozeanischen, atmosphärischen oder hydrologischen Ursprungs beruhen, lässt sich auf die zugrunde liegenden geophysikalischen Prozesse schließen (Ilk et al. 2005), siehe Abb. 2.4. Diese Arbeiten können nur in groß angelegten nationalen und internationalen Forschungsverbänden (z.B. BMBF-Geotechnologien, DFG-Schwerpunkt), in denen Vertreter aller Geo-Disziplinen zusammenarbeiten, geleistet werden.

Um die Produkte der drei genannten Arbeitsbereiche der Geodäsie konsistent in einem Referenzsystem für die weitere Nutzung zu vereinigen, wurde von der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) 2005 das Projekt GGOS (Global Geodetic Observing System) gestartet, an dem sich das IfE auf verschiedenen Ebenen beteiligt. Damit soll das System Erde als Ganzes betrachtet und zielgerichtet auf mm-Niveau untersucht werden.

¹ CHAMP CHALLENGING Minisatellite Payload
GRACE Gravity Recovery And Climate Experiment
GOCE Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

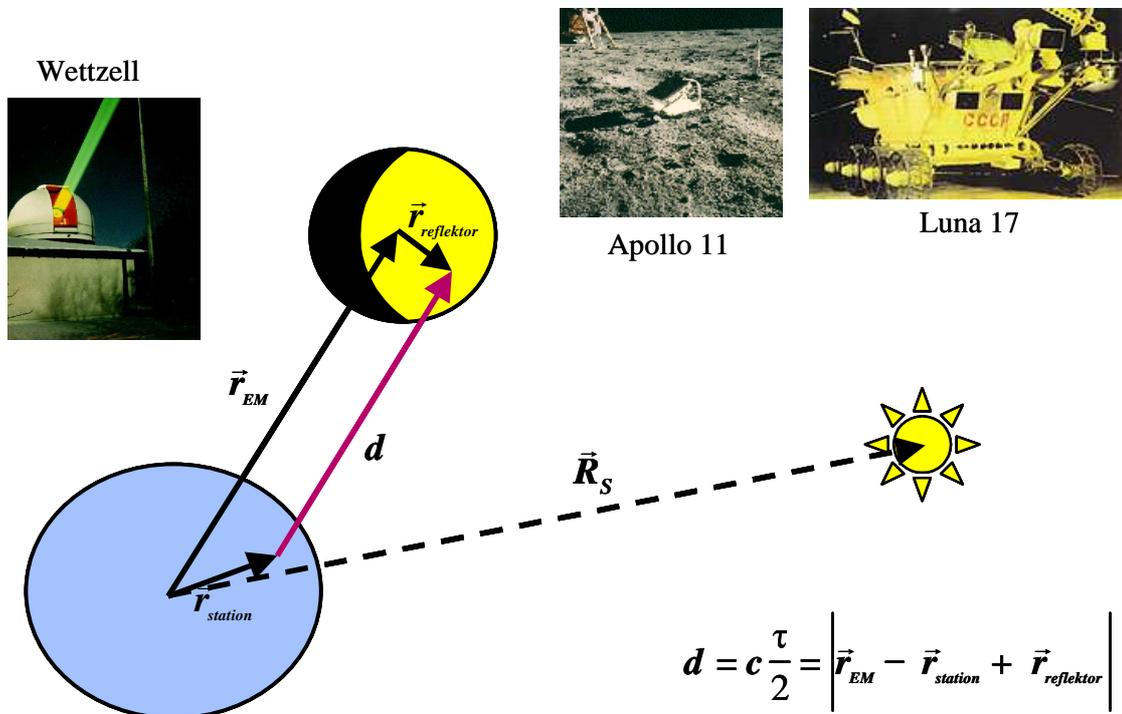


Abb. 2.1: Lunar Laser Ranging: Grundprinzip, Beobachtungsstation Wettzell sowie Reflektoren auf dem Mond [Quelle für Reflektorabbildungen: NASA]



Abb. 2.2: Das Absolutgravimeter FG5-220 des Instituts für Erdmessung



Abb. 2.3: Die zwei Satelliten der Schwerefeldmission GRACE
 [Quelle: Astrium GmbH, Quelle: Webseiten des GeoForschungsZentrum Potsdam]

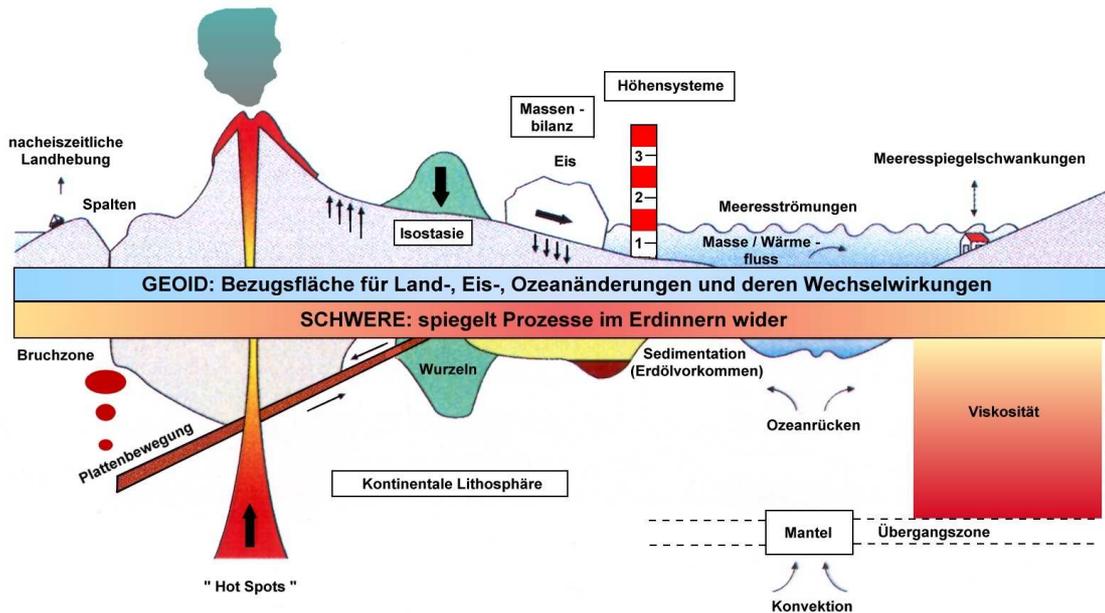


Abb. 2.4: Geophysikalische Prozesse im System Erde [Quelle: GOCE Projektbüro]

3 Satellitenbilder und Satellitenfernerkundung

Photogrammetrie und Fernerkundung beschäftigen sich seit jeher mit der Erfassung und Aktualisierung von Geoinformation in Form von Passpunktkoordinaten, Digitalen Geländemodellen (DGM), Orthophotomosaiken und der zwei- und dreidimensionalen Beschreibung topographischer Objekte im Vektorformat (Konecny 1996). Daneben bilden die Bilddaten zusammen mit den dahinter stehenden Abbildungsgleichungen auch die Grundlage für Computeranimationen wie künstliche Perspektivansichten und Geländeüberflüge. In diesem Kapitel geht es primär um den Stand der Satellitenfernerkundung, es sei aber angemerkt, dass die zugrunde liegenden Techniken auch für Luftbilder und terrestrische Aufnahmen eingesetzt werden.

Satellitenbilder haben für die Erdbeobachtung gegenüber Luftbildern einige wichtige Vorteile: (a) sie decken einen größeren Bereich ab, (b) sie sind von praktisch allen Bereichen der Erde erhältlich und (c) die Wiederholrate ist relativ hoch. Für Radarsensoren gilt zusätzlich, dass zu jeder Tages- und Nachtzeit Bilder aufgenommen werden können, da es sich um aktive Sensoren handelt und die zugrunde liegende Mikrowellenstrahlung Wolken durchdringt (dies gilt allerdings natürlich auch für Flugzeug getragene Radarsysteme). Den genannten Vorteilen stehen als Nachteile gegenüber: (a) die nach wie vor geringere geometrische Auflösung und Genauigkeit, (b) die geringere zeitliche und räumliche Flexibilität bei der Bildaufnahme, (c) die Abhängigkeit von den wenigen Satellitenbetreibern, und (d) in vielen Fällen auch die Kosten.

Seit einigen Jahren ist die Anzahl an verfügbaren Satellitensensoren stark gestiegen. Die meisten Sensoren beruhen auf dem so genannten „Push-broom“-Prinzip, bei dem eine oder mehrere CCD-Zeilen in der Bildebene des Sensors senkrecht zur Flugrichtung montiert sind und die Erdoberfläche in überlappenden Streifen abscannen. Zur Erhöhung der Wiederholrate kann die Bildebene geeignet geschwenkt werden, ebenso sind Stereoaufnahmen in einem Überflug möglich (s. Abb. 3.1). Im Radarbereich ist ausschließlich das SAR-Prinzip (Synthetic Aperture Radar) anzutreffen. Neben Frankreich, Indien, Japan, Russland und den USA, die seit Jahren bzw. Jahrzehnten über Satellitenbilddaten verfügen, sind inzwischen auch Länder wie Algerien, Brasilien, China, Israel, Korea, Taiwan und die Türkei in der Lage, derartige Bilder für eigene Zwecke oder für den weltweiten Vertrieb zur Verfügung zu stellen. Deutschland baut nach einer Reihe von

erfolgreichen experimentellen Systemen (Metric Camera, MOMS-02/D2², MOMS-Priroda, SRTM) derzeit mit RapidEye und TerraSAR-X je ein optisches und ein Radarsystem auf. Neben einer hohen räumlichen Auflösung der Bilder – der Meterbereich ist heute Standard – verfügen einige Sensoren auch über eine immer höhere Anzahl spektraler Kanäle, zur direkten DGM-Bestimmung werden Laserscannersysteme diskutiert, mit denen heute vom Flugzeug aus DGMs und Oberflächenmodelle erfasst werden.

Derartige Systeme liefern Punktkoordinaten mit einer Genauigkeit im Submeterbereich, globale DGMs mit Höhengenaugkeiten, die je nach Gebiet zwischen 3 m und 15 m schwanken, und Orthophotokarten mit einer Bodenauflösung von 0.5 – 1 m. Sie werden zur Erfassung und Aktualisierung topographischer GIS-Datenbanken verwendet, die den traditionellen Topographischen Karten im Maßstab 1:10.000 entsprechen. Wichtige Anwendung finden die Bilder auch in der Landwirtschaft, in der die hohe Wiederholrate z. B. für die Ernteschätzung wesentlich ist, in der Forstwirtschaft zur Bestimmung des Holzvolumens, im Umweltschutz zur Berechnung der Biomasse, sowie im Versicherungswesen zur Schadensdokumentation. Auch im Katastrophenmanagement spielen aktuelle Satellitenbilder eine immer wichtigere Rolle.

Wissenschaftlich wie praktisch stellt die automatische Erfassung und Aktualisierung von Geoinformationen derzeit die größte Herausforderung dar. Neben den klassischen, pixelbasierten Multispektralklassifikationsansätzen werden dazu zunehmend objektbasierte Klassifikationsmethoden und Ansätze der modellbasierten Bildanalyse eingesetzt (Heipke 2003).

Das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover spielt seit Jahren eine wichtige Rolle bei der Auswertung von Satellitendaten und war bzw. ist wesentlich an den Experimenten Metric Camera, ERS³, MOMS-02/D2, MOMS-Priroda und ENVISAT beteiligt. So ist es mit an der Universität entwickelter Software möglich, die äußere Orientierung aller gängigen Bilddaten zu bestimmen und die Bilder so auch für die photogrammetrische Punktbestimmung zu nutzen (Jacobsen 2003). Untersuchungen zur Shuttle Radar Topography Mission SRTM (Abb. 3.2) haben das hohe Genauigkeitspotenzial des durch Radarinterferometrie bestimmten globalen DGMs nachgewiesen (Heipke et al. 2002), und Untersuchungen zu fast allen verfügbaren Bilddaten in ein und demselben Testfeld in der Türkei ermöglichen einen Vergleich praktisch aller relevanter Bilddaten in Bezug auf geometrische Genauigkeit und Detailerkennbarkeit (Topan et al. 2004). Seit fast

² MOMS: Modular Optoelectronic Multispectral Scanner

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

³ ERS: European Remote Sensing Satellite

20 Jahren wird der weltweit neueste Stand in der Satellitenfernerkundung alle 2 Jahre an der Universität Hannover auf dem ISPRS Hannover Workshop mit mehr als 100 Teilnehmern aus aller Welt vorgestellt und diskutiert; der letzte Workshop fand im Mai 2005 statt (Heipke et al. 2005), das nächste Treffen ist für den Mai 2007 geplant.

Auch an der derzeit laufenden Mission Mars-Express, auf der mit der HRSC (High Resolution Stereo Camera, Neukum et al. 2004) zum ersten Mal in der Geschichte der Weltraumforschung ein für topographische Zwecke entwickelter Sensor auf einer planetaren Mission eingesetzt wird, ist das IPI beteiligt (Schmidt et al. 2005). Ziel der Mission ist es, die Oberfläche und die Atmosphäre unseres Nachbarplaneten mit unterschiedlichen Messverfahren zu erfassen und so seine Entwicklung besser zu verstehen. Die HRSC hat zum jetzigen Zeitpunkt (Oktober 2005) bereits etwa 50 % der Marsoberfläche aufgenommen (s. Abb. 3.3), die restliche Fläche soll in den verbleibenden ca. 24 Monaten folgen. Auch in der planetaren Fernerkundung haben sich die in Hannover entwickelten und ursprünglich für die Erdbeobachtung gedachten Bildauswertemethoden bestens bewährt.

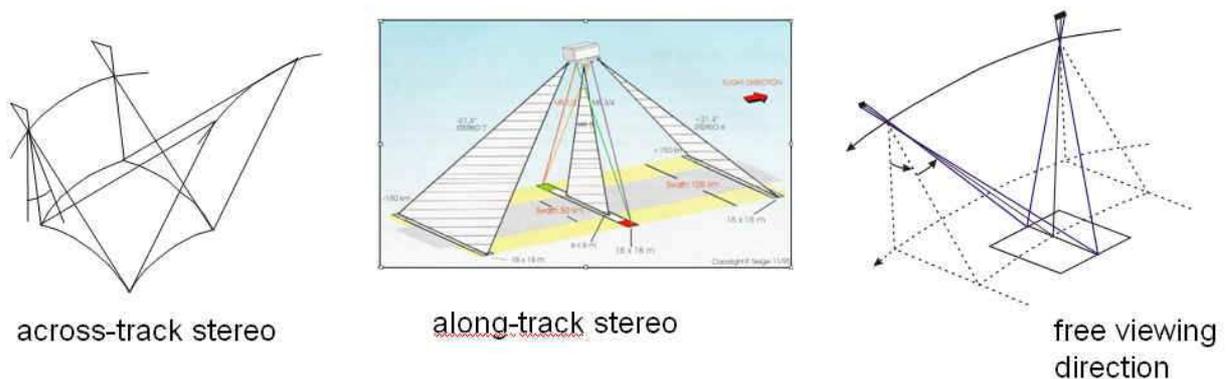


Abb. 3.1: Verschiedene Sensormodelle für Fernerkundungssatelliten (angelehnt an Jacobsen 2003)

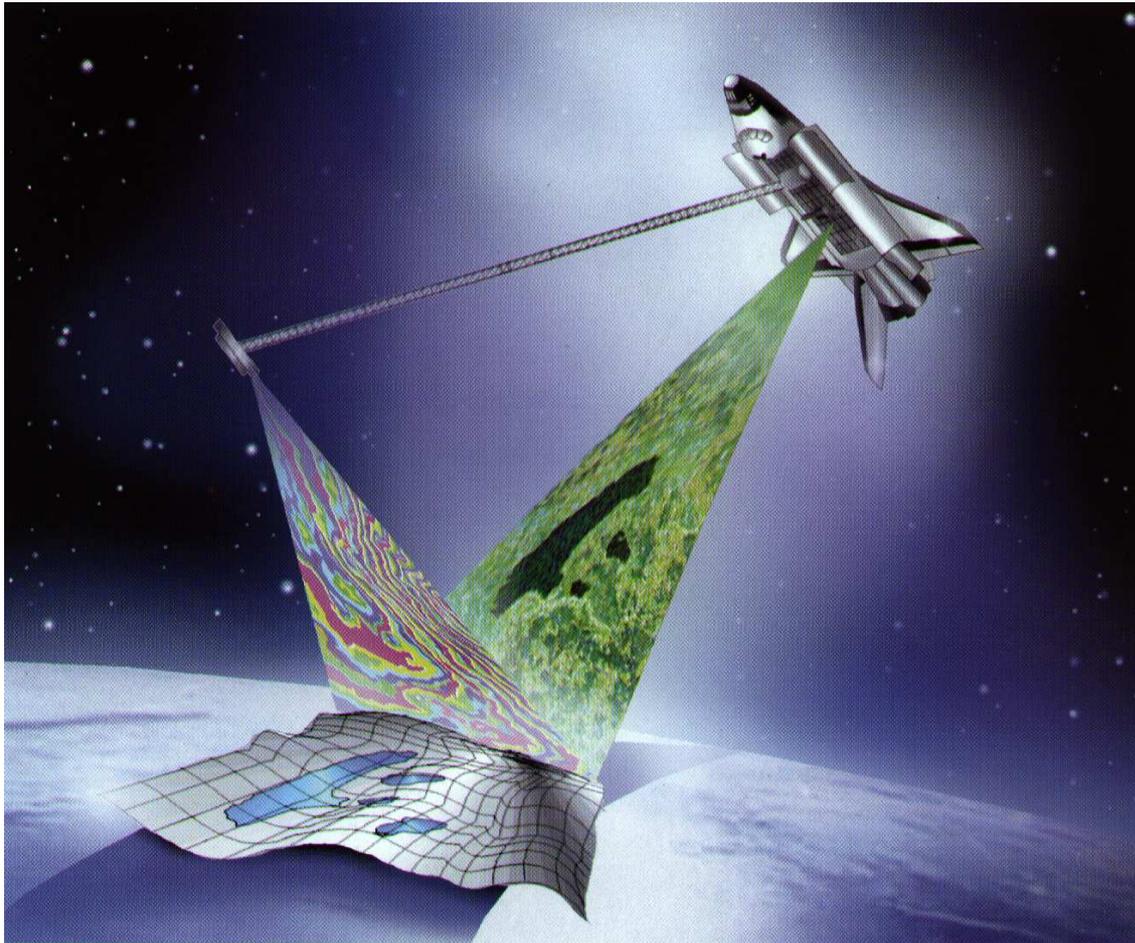


Abb. 3.2: Die Shuttle Radar Topography Mission SRTM, die im Februar 2000 in 11 Tagen die Daten für ein globales Digitales Geländemodell der Erdoberfläche mit einer Höhengenaugigkeit von 3 – 15 m aufnahm (© Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt).

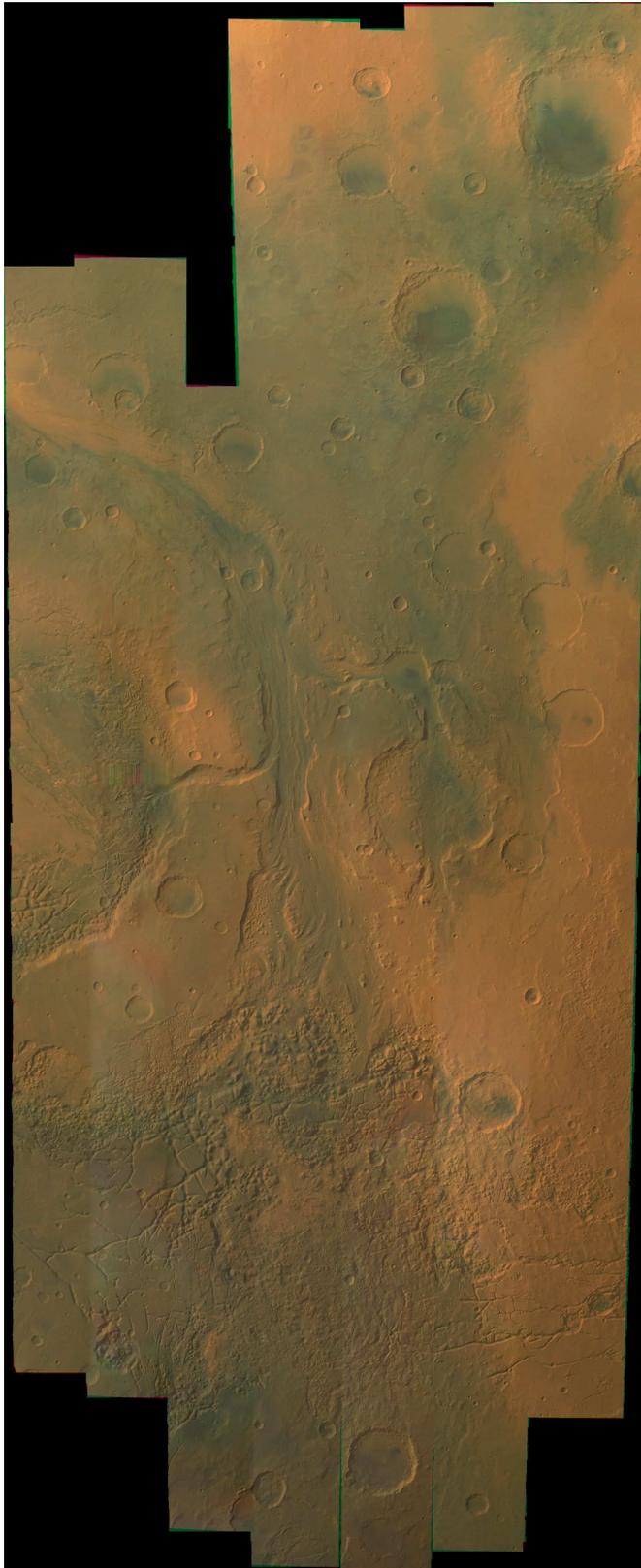


Abb. 3.3: Farbiges Orthophotomosaik aus sieben Bildstreifen der Region Iani Chaos auf dem Mars (© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum))

4 Satellitengestützte Positionsbestimmung und Navigation

In den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts lösten satellitengestützte Messmethoden die klassischen geodätischen Verfahren der terrestrischen Winkel- und Streckenmessung zur Bestimmung geodätischer Kontrollpunkte weitgehend ab. Die Überlegenheit gegenüber den bodengebundenen Verfahren ist leicht einsichtig. Durch die Einbeziehung hochfliegender künstlicher Satelliten als Zielpunkte in großräumigen Netzen gelingt es, auch große Entfernungen ohne gegenseitige Sichtverbindungen auf der Erdoberfläche zu überbrücken. Ein erstes spektakuläres Ergebnis war, dass damit die von Alfred Wegener in den 20er Jahren des vergangenen Jahrhunderts aufgestellte Hypothese der Kontinentalverschiebung durch direkte Messungen bestätigt werden konnte.

Die ständig zunehmende Genauigkeit der verwendeten Messverfahren, führte dazu, dass man heute jeden Ort auf der Erde in Beziehung zu jedem beliebigen anderen Ort in Echtzeit mit nahezu beliebiger Genauigkeit bestimmen kann. Diese hohe Leistungsfähigkeit eröffnet eine fast unbegrenzte Fülle von Einsatzmöglichkeiten. Die auch für Fachleute atemberaubende Entwicklung von der Meter- zur Subzentimetergenauigkeit fand innerhalb von nur drei Jahrzehnten statt. Das Institut für Erdmessung (IfE) der Universität Hannover hat diese Entwicklung nicht nur in zahlreichen Anwendungsprojekten in internationaler Kooperation mitgenutzt, sondern auch durch eine Vielzahl methodischer Beiträge mitgestalten können. Eine kleine Auswahl wird nachstehend genannt.

Das vorherrschende operationelle geodätische Satellitenmessverfahren der 70er Jahre war das sogenannte TRANSIT-Dopplersystem. Das IfE verfügte im Rahmen des damaligen Sonderforschungsbereiches 149 „Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren an Küsten und Meeren“ über drei Dopplerempfangsanlagen, die regelmäßig für die Navigation von Forschungsschiffen, aber auch für Aufgaben der präzisen Positionsbestimmung an Land eingesetzt wurden. So konnte in Kooperationsprojekten mit Venezuela und Brasilien die Qualität bestehender klassischer geodätischer Netze überprüft werden. Eine besondere Herausforderung bildete die um 1980 verstärkt beginnende deutsche Antarktisforschung. In Zusammenarbeit mit dem chilenischen Antarktisinstitut konnten auf der Antarktischen Halbinsel erstmals Kontrollmessungen zur Gletschereisbewegung als ein früher Beitrag zur Frage der polaren Eismassenbilanz durchgeführt werden. Wesentlich war es dabei, Kontrollpunkte auf festem Untergrund zu finden (Abb. 4.1).

Zu Beginn der 80er Jahre wurde in den Vereinigten Staaten von Amerika als Nachfolgesystem für TRANSIT das Global Positioning System NAVSTAR GPS aufgebaut. Diese Entwicklung, die in Europa anfangs nur wenig beachtet wurde, konnte in Hannover

frühzeitig aufgegriffen werden, da der Universität Hannover durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft bereits 1983 die Beschaffung einer der ersten leistungsfähigen GPS-Empfangsanlagen in Europa ermöglicht wurde. Das Gerät wurde nahezu ununterbrochen während einiger Jahre für Aufgaben der Präzisionsnavigation und der geodätischen Positionsbestimmung eingesetzt. Auf den großen deutschen Forschungsschiffen SONNE, METEOR und POLARSTERN wurde es dadurch möglich, Kartierungen des Meeresbodens mit bis dahin unerreichter Genauigkeit im Indischen Ozean, im Süd- und Nordatlantik sowie auf dem pazifischen Galapagosrücken während mehrwöchiger Forschungsreisen vorzunehmen. Bei solchen Expeditionen waren regelmäßig auch Studierende beteiligt.

In Kooperation mit in- und ausländischen Hochschul- und Forschungsinstituten konnte das IfE frühzeitig mit größeren GPS-Projekten beginnen. So wurde 1986 erstmals in der gesamten Bundesrepublik und angrenzenden Gebieten ein geodätisches Grundlagennetz mit etwa 50 Stationen (DÖNAV) und einer Punktgenauigkeit von wenigen Zentimetern beobachtet. Beispielhafte Anwendungen für die Nutzung von GPS für die Kontrolle und Erweiterung bestehender geodätischer Netze folgten in Brasilien, Venezuela, Zimbabwe und Indien, in der Regel in Verbindung mit einer intensiven Schulung einheimischer Fachkräfte. Im Zusammenhang mit der Einrichtung des hochpräzisen südamerikanischen Referenznetzes SIRGAS bearbeitete das IfE den brasilianischen Anteil. Heute ist SIRGAS ein Musterbeispiel für internationale geodätische Kooperation und bildet den gesetzlichen Rahmen für das Landmanagement und Kataster in mehreren Ländern Lateinamerikas. Im Nordseebereich gelang es, durch Kombination von satellitengeodätischen und gravimetrischen Messverfahren den Pegel Helgoland neu zu bestimmen und mit einer Korrektur von 28 cm an NN anzuschließen (Seeber et al. 1997).

In Island führte das IfE gemeinsam mit englischen und isländischen Partnern von 1987 bis 1995 wiederholt interdisziplinäre GPS-Kampagnen in der nordöstlichen neovulkanischen Zone zur Erfassung von Bodenbewegungen im Zusammenhang mit vulkanischen Aktivitäten durch. Durch diese Messungen konnte erstmalig ein Modell der Plattentektonik an einer aktiven divergenten Plattengrenze erarbeitet und in der renommierten Zeitschrift „Nature“ veröffentlicht werden (Foulger et al. 1992). Rezente Krustenbewegungen in einem seismisch hochgefährdeten Gebiet wurden gemeinsam mit dem nationalen chinesischen seismologischen Institut in der Provinz Yünnan bestimmt (Zhao et al. 1999).

Höhenänderungen aufgrund vulkanischer Aktivitäten wurden am Vulkan Mayon auf den Philippinen überwacht. Auch die Studien zur Eisbewegung konnten während insgesamt etwa

10 Jahren mit GPS intensiv im Bereich des Filchner Schelfeises und der deutschen Antarktisstation „Georg v. Neumeyer“ weitergeführt werden und führten zu einem detaillierten Verständnis der Bewegungsvorgänge (Abb. 4.2).

Neben den zahlreichen internationalen Projekten, in denen Grenzen und Möglichkeiten der Nutzung von Satellitenmethoden für die Positionsbestimmung und Navigation ausgelotet wurden, konnten beim IfE, bedingt durch den frühen Beginn der Forschungsarbeiten, wesentliche methodische Beiträge geleistet werden, die internationale Anerkennung gefunden und zu mehr als 15 Dissertationen geführt haben. Als Stichworte können hier die Nutzung undifferenzierter Beobachtungen, die Entwicklung von Mehrdeutigkeitslösungen in Bewegung und die Vernetzung von Referenzstationen genannt werden. Letzteres spielt eine wichtige Rolle beim Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS).

Eine besondere Entwicklung in Zusammenarbeit mit der Industrie und der Deutschen Luft- und Raumfahrt (DLR) führte zu der weltweit bislang einzigartigen Methode der hochpräzisen absoluten Kalibrierung von GPS-Antennen in realer Umgebung mit Hilfe eines Roboters. Auf der Grundlage dieses Verfahrens wurde im Jahr 2005 erstmals eine für Weltraumeinsätze vorgesehene GPS-Antenne in Kooperation mit der European Space Agency (ESA) in Gebrauchslage kalibriert (Abb. 4.3). Die Antenne soll zur präzisen Positionierung des Satelliten GOCE dienen, der im Jahre 2006 gestartet werden soll.

Aufgrund der langjährigen Erfahrungen mit satellitengestützten Positionierungsmethoden wie GPS ist das IfE gut vorbereitet, um in den kommenden Jahren die Herausforderungen und Möglichkeiten des Europäischen Satellitennavigationssystems GALILEO zu nutzen.



Abb. 4.1: Satellitenmessungen in der Antarktis



Abb. 4.3: Kalibrierung der GOCE Antenne

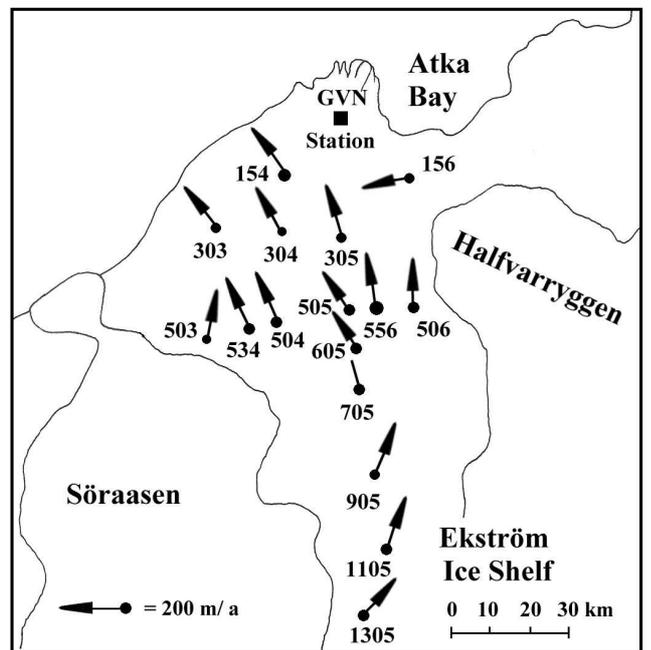


Abb. 4.2: Eisbewegung aus GPS

5 Geodätische Überwachungsnetze und Deformationsmessungen

Die hoch genaue geodätische Überwachung von Bauwerken aller Art oder rezenter Bewegungen der Erdkruste ist ein wichtiger Beitrag zur Vermeidung von Katastrophen bzw. der Minderung ihrer Auswirkungen. Diese Aufgabe weist viele Facetten auf, wobei die relevanten räumlichen und zeitlichen Skalen das wesentliche Merkmal sind. Daneben stehen die Zugänglichkeit und Signalisierbarkeit der Punkte sowie der Zeitverzug, mit dem die geodätischen Ergebnisse vorliegen müssen, um steuernd eingreifen zu können.

Bei geodätischen Überwachungsmessungen nimmt die satellitengestützte Positionsbestimmung aufgrund ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeiten, heute unter ausschließlicher Nutzung des U.S.-amerikanischen Global Positioning Systems (GPS), künftig in Kombination mit dem europäischen System Galileo, eine zentrale Rolle ein. In der Praxis werden Arrays von GPS-Empfangssystemen eingesetzt, mit denen permanent oder über einen vordefinierten Zeitraum hinweg mit hoher Datenrate aufgezeichnet wird. Solche Arrays repräsentieren relative Anordnungen, durch die eine Vielzahl von Störeffekten bei der Auswertung der Messdaten deutlich reduziert werden kann. So werden Subzentimeter-Genauigkeiten in Echtzeit möglich.

In der Regel wird das GPS in eine heterogene Messanordnung eingebunden, da bei Projekten wie Bauwerksüberwachungen – eine traditionelle Aufgabe der Ingenieurgeodäsie – oft Abschattungen und verstärkte Mehrfachreflexionen der Signale auftreten. Im Bauwerksinneren ist das GPS für die geodätische Überwachung prinzipiell unbrauchbar, es sei denn, es werden terrestrische Sender der GPS-Signale (sogenannte Pseudolites) eingesetzt.

Das Geodätische Institut der Universität Hannover (GIH) arbeitet seit längerem erfolgreich mit heterogenen, GPS-gestützten Messanordnungen in der Landesvermessung und bei Überwachungsmessungen, siehe z. B. Neuner et al. (2004). Bei der Überwachung von Tunnelbauwerken wird das GPS beispielsweise zur Ausmessung und Verknüpfung der Portalbereiche eingesetzt, im Bauwerksinneren werden automatische Tachymeter (zielsuchende und zielverfolgende polare Messsysteme) und digitale Nivelliere verwendet. Abb. 5.1 zeigt die vom GIH geodätisch bestimmte vertikale Deformation eines

Tunnelbauwerks (Wesertunnel) unter dem Einfluss von Meeresgezeiten zwischen zwei Extremaltiden.

Bei solchen Aufgaben gibt es eine Reihe von Fragestellungen, an denen am GIH intensiv geforscht wird, z.B. die drahtlose Kommunikation zwischen den eingesetzten Messinstrumenten und Serverrechnern mittels PDA- oder WLAN-Technologie oder die optimale Steuerung der Mess- und Auswerteprozesse, um letztlich eine qualitativ hochwertige Automation der Abläufe zu gewährleisten. Von zunehmender Bedeutung sind die terrestrischen Laserscanner – polare dreidimensionale Messsysteme, die die zu überwachenden Objekte mit hoher räumlicher Auflösung, d.h. quasi flächenhaft, und in dichter zeitlicher Folge aufnehmen können. Abb. 5.2 zeigt das Schwingungsbild einer Windenergieanlage, das mittels terrestrischem Laserscanning (Abb. 5.3) erhalten wurde (Hesse et al. 2005).

Entscheidend für die zutreffende Beurteilung des Bewegungs- bzw.

Deformationsverhaltens von Bauwerken und anderen Objekten ist die Trennbarkeit zwischen den tatsächlich gesuchten Effekten und solchen, die durch die Mess- und Auswerteverfahren induziert werden. So kann die durch GPS-Messungen ermittelte Bewegung der Krone einer Staumauer durch unterschiedliche Wasserstände oder Luft- und Wassertemperaturen bedingt sein, vergleichbare Effekte können auch durch Inhomogenitäten in der Atmosphäre verursacht und somit irrelevant sein.

Die Konzeption, Durchführung und Analyse geodätischer

Überwachungsmessungen erfordert deshalb umfassende Kenntnisse (und Konventionen) in der Modellierung von Objekt und Messungen zur Vermeidung systematischer Verfälschungen der Ergebnisse sowie standardisierte Auswert- und Analyseverfahren. Von besonderer Bedeutung ist die Bewertung der Signifikanz der Ergebnisse, um sicherheitsrelevante Ereignisse schnell und zuverlässig identifizieren zu können. Hierzu ist die immanente Unsicherheit adäquat zu quantifizieren und zu behandeln.

Entsprechende Untersuchungen bilden einen Schwerpunkt der methodischen Arbeiten am GIH; sie sind wesentlicher Bestandteil eines umfassenden Qualitätskonzeptes in der Geodäsie, das die etablierten Beschreibungen für Genauigkeit und Zuverlässigkeit deutlich erweitert.

In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass die isolierte Betrachtung von Messinstrumenten oder einzelnen Auswerteverfahren durch eine ganzheitliche

Sichtweise abgelöst werden muss, bei der der vollständige Mess- und Auswerteprozess mit allen Komponenten und Schritten betrachtet und modelliert wird (Kutterer 2002). Zusätzliche Qualitätsmerkmale sind nun die Aktualität und Konsistenz der Daten oder die Effizienz des Prozesses. Traditionelle statistische Werkzeuge werden um Methoden der Bayes-Statistik und der Modellierung und Analyse unscharfer Größen (Fuzzy-Theorie) ergänzt.

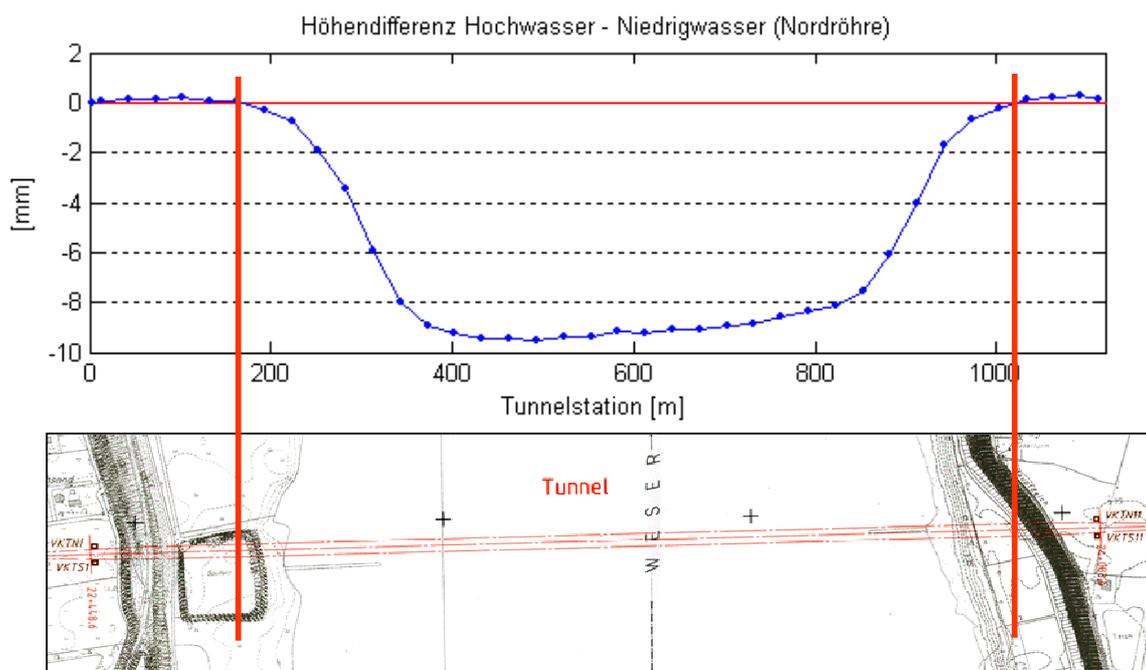


Abb. 5.1: Vertikale Verformung einer Tunnelröhre infolge von Gezeiteneinfluss

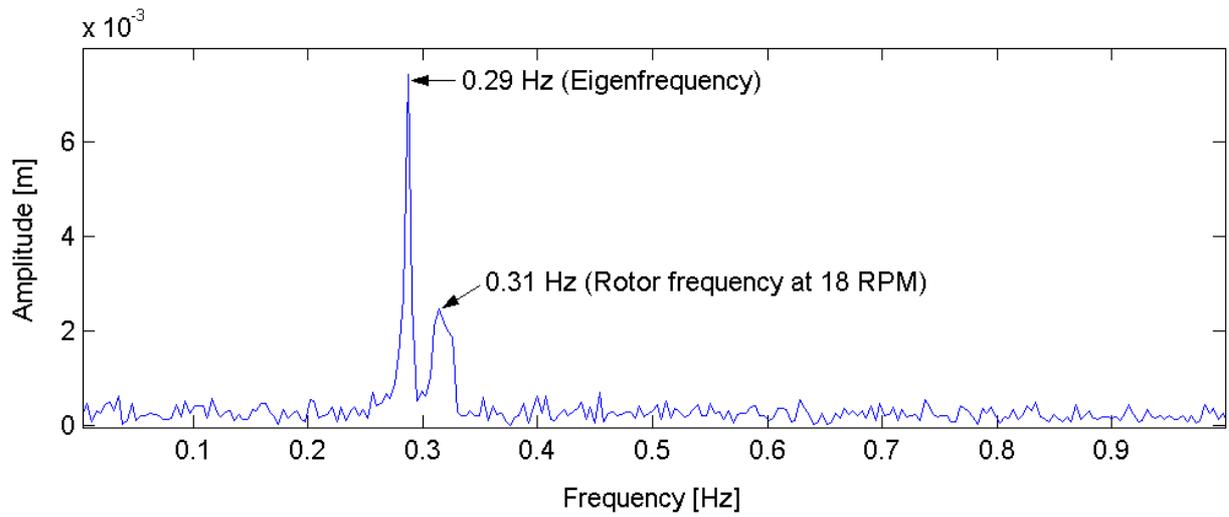


Abb. 5.2: Frequenzspektrum des Pylons einer Windenergieanlage, abgeleitet aus Profilmessungen mit einem terrestrischen Laserscanner



Abb. 5.3: Terrestrischer Laserscanner vor einer Windenergieanlage

6 Datenmanagement und Visualisierung

Die Fülle an Daten, die mittels der heute verfügbaren Datenerfassungsmethoden und Sensoren zusammengetragen werden, müssen in sinnvoller Weise verwaltet werden, um nutzbar zu sein. Typischerweise werden Geodaten in räumlichen Datenverwaltungssystemen, sogenannten Geo-Informationssystemen (GIS) vorgehalten. Diese ermöglichen einen effizienten Datenzugriff auf die potentiell sehr großen Datenbestände, eine räumlich-thematische Datenanalyse sowie eine adäquate Visualisierung. Heutige GIS-Produkte leisten dies effizient. Allerdings besteht noch breiter Forschungsbedarf in einer Reihe von Gebieten; einige davon, zu denen das Institut für Kartographie und Geoinformatik besondere Beiträge leistet, sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

Die Datenanalyse ermöglicht es, aus den gesammelten Daten neue Information abzuleiten. Dies erfolgt beispielsweise durch Zusammenführen und Fusion von Daten unterschiedlicher Herkunft oder auch durch räumliche Datenanalyse. Geo-Informationssysteme verfügen über eine große Zahl an einzelnen Werkzeugen, die eine interaktive Durchführung dieser Datenanalyse ermöglichen. Die Forschung konzentriert sich heute darauf, neue Methoden zu entwickeln, die in der Lage sind, diese Analysen automatisch durchzuführen. Man spricht von Verfahren des Spatial Data Minings; hier geht es primär darum, in einer großen Menge von räumlichen Daten sinnvolle Zusammenhänge aufzudecken, die vorab nicht explizit bekannt sind. Anwendungen hierzu liegen beispielsweise darin, optimale Standorte für Industrieansiedlungen zu finden, oder besondere typische Landschaftsstrukturen aufzudecken. Ein konkretes Beispiel sind spezielle geometrische Strukturen, die in Städten häufig zu finden sind, etwa Rasterstrukturen, oder sternförmige Anordnungen von Straßen (Heinzle et al. 2005). Abb. 6.1 zeigt Beispiele hierfür.

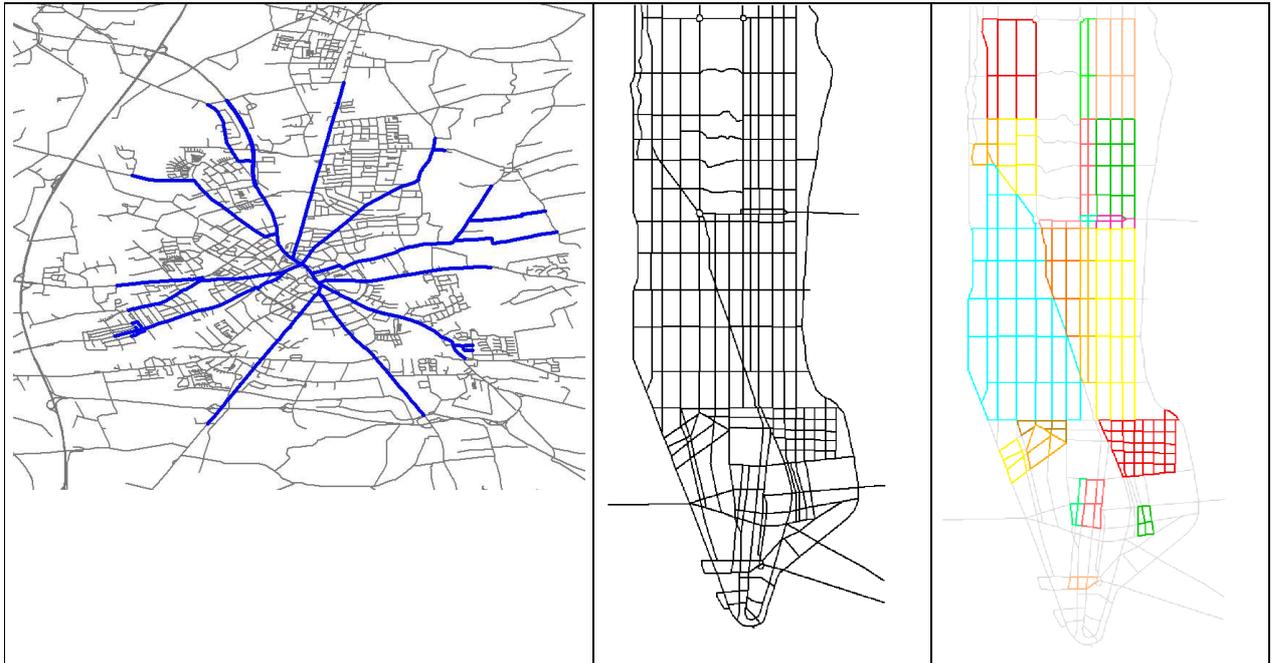


Abb. 6.1: Automatische Detektion von sternförmigen Straßenmustern (links), sowie unterschiedlichen Rasterstrukturen innerhalb von Städten: Beispiel Manhattan (Mitte), automatisch detektierte gleichartige Raster (rechts).

Durch Integration und Fusion von Daten verschiedener Quellen kann ebenfalls neue Information gewonnen werden. Flugzeuggetragene Laserscanner tasten die Erde mit einer sehr hohen Punktdichte ab und liefern eine Punktwolke der Erdoberfläche. Kombiniert man diese Daten mit Gebäudegrundrissen aus dem Kataster, so lassen sich automatisch 3D-Gebäude bestimmen. Durch angepasste Verfahren aus dem Bereich der Algorithmischen Geometrie können nicht nur Gebäudehöhen ermittelt, sondern auch dedizierte Dachformen rekonstruiert werden (Brenner 2005). Auf diese Weise wurde vollautomatisch ein 3D-Stadtmodell eines Teils des Stadtgebietes von Hannover abgeleitet. Abb. 6.2 zeigt einen Ausschnitt eines Laserdatensatzes der Oper von Hannover; rechts ist ein Ausschnitt des daraus automatisch abgeleiteten 3D-Stadtmodells zu sehen.

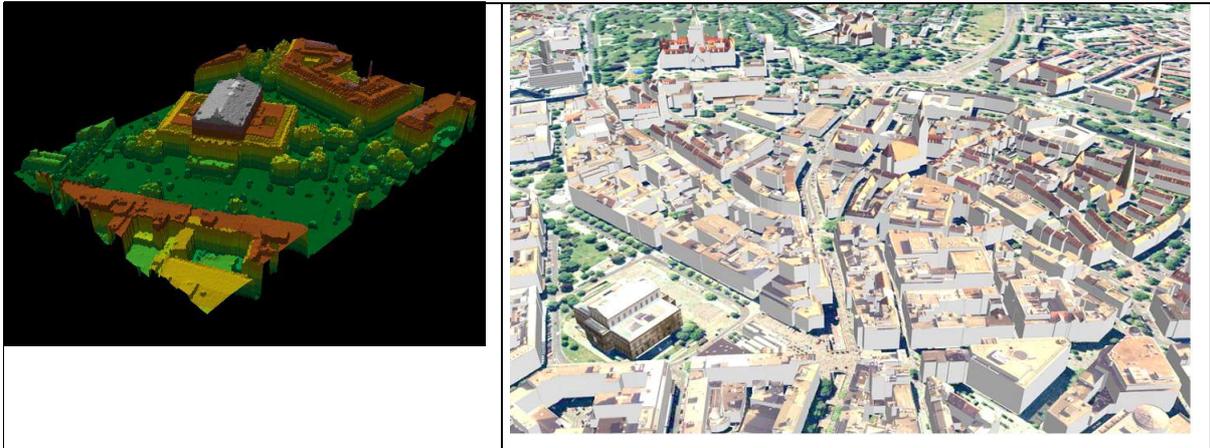


Abb. 6.2: Laserdatensatz: Höhen farblich codiert (links); automatisch rekonstruierte Gebäudemodelle in Form eines 3D-Stadtmodells von Hannover (rechts).

Raumbezogene Daten müssen in sinnvoller Weise aufbereitet werden, so dass ein Nutzer sie unmittelbar verstehen kann. Für diese Aufgabe wurden in der Kartographie Regeln aufgestellt, die eine effiziente Kommunikation ermöglichen. Diese traditionell für zweidimensionale Präsentationen ausgelegten Regeln müssen heute angepasst werden an neue Gegebenheiten, die durch moderne Informationstechniken und Visualisierungsmethoden erwachsen sind: Zum einen sind Geodaten inzwischen in digitaler Form verfügbar und auch über das Internet beziehbar. Ein sehr aktuelles und prominentes Beispiel hierfür ist das Programm Google Earth, das primär mittels Luft- und Satellitenbildern eine faszinierende Inspektion der gesamten Erde ermöglicht. Zweitens sind heute sehr kleine mobile Geräte vorhanden, die über Miniatur-Bildschirme verfügen (etwa Handys oder PDA's, oder auch Bildschirme im Auto). Beide Faktoren haben dazu geführt, dass Karten heutzutage nicht mehr nur ein starres Produkt sind, die einmal möglichst für verschiedenste Zwecke geeignet erstellt werden, sondern dazu, dass Karten für eine augenblickliche Situation optimal generiert werden können – und somit quasi nur virtuell für den Nutzer vorhanden und nach der Nutzung wieder obsolet sind. Dies schafft ganz neue Möglichkeiten der Adaption der Karte an den mobilen Nutzer und an seine aktuelle Aufgabe: im Sinne so genannter Location Based Services (LBS) wird ihm in seiner aktuellen Situation eine Karte seiner lokalen Umgebung angezeigt, in der genau die Objekte visualisiert werden, die er momentan benötigt. Im Rahmen eines EU-Projektes wurden am Institut für Kartographie und Geoinformatik der Universität Hannover Methoden entwickelt, Karten nutzergerecht auf einem mobilen Gerät zu visualisieren (Nivala und Sarjakoski 2004). Abb. 6.3 zeigt

verschiedene automatische Anpassungsmethoden z. B. an das Alter des Nutzers und an die Jahreszeit.

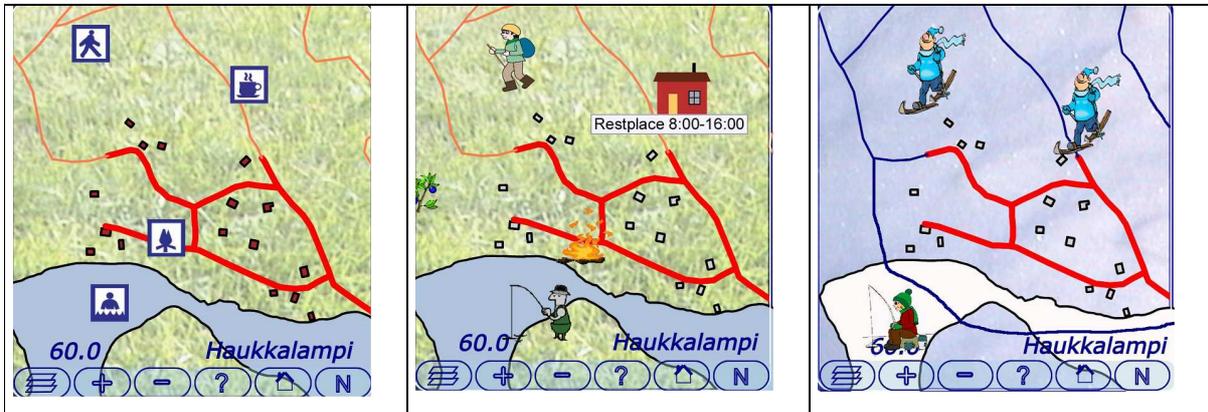


Abb. 6.3: Automatische Adaption eines Kartenbildes an verschiedene Nutzerszenarien

Um es dem Nutzer zu ermöglichen, sowohl eine allgemeine Übersicht zu erhalten, als auch genau in die Details zu zoomen, sind sogenannte Generalisierungsmethoden erforderlich. Diese ermöglichen es, sukzessive Details eines räumlichen Datenbestandes zu eliminieren, dabei immer jedoch die wichtigsten Objekte zu erhalten um somit die richtige Vorstellung des Raumes immer zu gewährleisten. Hierzu wurde ein automatisches Verfahren entwickelt, das auf sogenannten Selbstorganisierenden Merkmalskarten beruht, eine Methode der Neuronalen Netze (Sester 2005). Abb. 6.4 zeigt ein Beispiel, wie ein Siedlungsgebiet in kleiner werdendem Maßstab durch immer weniger, größer werdende Gebäudesignaturen repräsentiert wird; wichtig dabei ist es, dass die räumliche Verteilung und Dichte der Gebäude immer der Originalsituation entspricht.



Abb. 6.4: Darstellung einer Siedlung in verschiedenen Maßstäben: im großen Maßstab (links) können die Gebäude in größerer Zahl und höherem Detaillierungsgrad dargestellt werden; beide Werte gehen mit kleiner werdendem Maßstab zurück.

7 Fazit

Die Hannoveraner Geodäsie und Geoinformatik hat sich in der Vergangenheit immer den Herausforderungen der Zeit gestellt und sie mit großem Erfolg gemeistert. Dies soll auch für die zukünftigen Aufgaben, die vermehrt im europäischen und internationalen Kontext angesiedelt sind und mit umfassenden theoretischen und experimentellen Ansätzen interdisziplinär zu lösen sein werden, so bleiben. Wesentliche Stichworte sind „System Erde“, „Geodateninfrastruktur“ und „ganzheitliches Qualitätsmanagement“. Die personellen Voraussetzungen zum Erreichen dieser Ziele wurden in den letzten Jahren durch eine Reihe von Neuberufungen geschaffen – im Jahr der 175-Jahrfeier der Universität Hannover werden in Geodäsie und Geoinformatik sechs Professoren und zwei Juniorprofessoren lehren. Im Sinne der Einheit von Forschung und Lehre wurde das Studium den neuen Erfordernissen angepasst; zum Wintersemester 2005/06 startete in Hannover der deutschlandweit erste konsekutive Studiengang „Geodäsie und Geoinformatik“, international akkreditiert und mit modularem Studiensystem und modernen Lehrinhalten ausgestattet.

Vor diesem Hintergrund sehen wir den neuen, hochinteressanten Herausforderungen der kommenden Jahre mit großem Enthusiasmus und einem gewissen Optimismus entgegen. Wir haben das Ziel, auch in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung unseres Faches zu spielen.

Literatur

Bialas V. (1982): Erdgestalt, Kosmologie und Weltanschauung. Wittwer, Stuttgart.

Brenner C. (2005): Building reconstruction from images and laser scanning. Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Theme Issue on "Data Quality in Earth Observation Techniques", **6**(3-4), Elsevier, 187-198.

Denker H., Barriot J.-P., Barzaghi R., Forsberg R., Ihde J., Kenyeres A., Marti U., Tziavos I.N. (2005): Status of the European Gravity and Geoid Project EGGP. In: Gravity, Geoid and Space Missions, C.Jekeli, L.Bastos, J.Fernandes (eds.), IAG Symposia, Vol. 129, 125-130, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

Foulger G.R., C.-H. Jahn, G. Seeber, u.a. (1992): Post-Rifting Stress Relaxation at the Divergent Plate Boundary in Northeast Iceland. Nature 358, 488-491.

Grossmann W. (1976): Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung. 3. Aufl., Wittwer, Stuttgart.

- Heinzle F., Sester M., Anders, K.-H. (2005): Graph-based Approach for Recognition of Patterns and implicit Information in Road Networks. In: Proceedings of 22nd International Cartographic Conference, 9.-16. July 2005, La Coruña/Spain.
- Heipke C., Koch A., Lohmann P. (2002): Analysis of SRTM DTM – methodology and practical results, *Bildtechnik/Image Science – Journal of the Swedish Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Heft 1, 69-80.
- Heipke C. (2003): Photogrammetrie und Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung. *Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation*, Heft 3, 165-180.
- Heipke C., Jacobsen K., Gerke M. (Eds.) (2005): ISPRS Hannover Workshop 2005 “High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information”, *International Archives of Photogrammetry, remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, Part I/W3 (on CD ROM).
- Hesse C., Neuner H., Kutterer H. (2005): Statistical Analysis of Kinematic Laser Scans, in: Grün, A. / Kahmen, H. (Eds.): *Optical 3-D Measurement Techniques*, Vienna, Austria, October 3-5,, Vol. 2, 103-112.
- Ilk K.H., Flury J., Rummel R., Schwintzer P., Bosch W., Haas C., Schröter J., Stammer D., Zahel W., Miller H., Dietrich R., Huybrechts P., Schmeling H., Wolf D., Götze H.J., Riegger J., Bardossy A., Güntner A., Gruber, T. (2005): *Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System*. GOCE-Projektbüro, TU München und GFZ Potsdam.
- Jacobsen K, (2003): DEM generation from satellite data. *EARSel Symposium, Ghent “Remote Sensing in Transition”*, Millpress, ISBN 90-77017-71-2, 273–276.
- Jarecki F., Wolf K.I., Denker H., Müller J. (2005): *Quality Assessment of GOCE Gradients*. In: *Observation of the Earth System from Space*. R.Rummel, Ch.Reigber, M.Rothacher, G.Boedecker, U.Schreiber, J.Flury (eds.), Springer.
- Konecny G. (1996): Hochauflösende Fernerkundungssensoren für kartographische Anwendungen in Entwicklungsländern. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 64. Jahrgang, Heft 2, 39-51.
- Kutterer H. (2002): *Zum Umgang mit Ungewissheit in der Geodäsie – Bausteine für eine neue Fehlertheorie*. DGK Reihe C, Nr. 553, C.H. Beck, München.
- Müller J., Timmen L., Gitlein O., Denker H. (2005a): *Gravity Changes in the Fennoscandian Land Uplift Area to be Observed by GRACE and Absolute Gravimetry*. In: *Gravity, Geoid and Space Missions*. C.Jekeli, L.Bastos, J.Fernandes (eds.), IAG Symposia 129, 304-309, Springer.

- Müller J., Williams J., Turyshev S., Shelus P. (2005b): Potential Capabilities of Lunar Laser Ranging for Geodesy and Relativity. Proceedings of the IAG General Assembly, held in Cairns, Australia, 22-26 August 2005, in print 2005, gr-qc/0509019.
- Neuner H., Heer R., Hesse C. (2004): Kombination verschiedener geodätischer Sensoren zur Überwachung von Kaimauern. In: Schwieger, V., Foppe, K. (Red.): Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung. Schriftenreihe DVW, Band 45, Wißner, Augsburg, 185-214.
- Nivala A-M. and L.T. Sarjakoski (2004): Preventing Interruptions in Mobile Map Reading Process by Personalisation. The 3rd Workshop on "HCI in Mobile Guides", in adjunction to: MobileHCI'04, 6th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, Sept. 13-16, 2004, Glasgow, Scotland. Electronic version http://www.comp.lancs.ac.uk/computing/users/kc/mguides04/pdfs/Nivala_Sarjakoski.pdf
- Schmidt, R., Heipke C., Brandt R., Neukum, G. und das HRSC Co-Investigator Team (2005): Automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten in HRSC-Bildern der Mars Express Mission. Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation, Heft 5, 373-380.
- Seeber G., W. Torge, H. Denker, H-J. Goldan (1997): Präzise Höhenbestimmung des Helgoländer Pegels. Die Küste, H. 59, 39-61.
- Sester M. (2005): Optimizing Approaches for Generalization and Data Abstraction. International Journal of Geographic Information Science, Vol. 19, Nr. 8-9, 871-897.
- Topan, H., Büyüksalih, G. Jacobsen, K. (2004): Comparison of Information Contents of High Resolution Space Images. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, Part B4, 583-588.
- Torge, W. (2003): Geodäsie. 2. Aufl., deGruyter, Berlin.
- Zhao S., X. Lai, G. Seeber et al. (1999) : The 1996 M=7.0 Lijiang earthquake, Yunnan, China : an anticipated event. J. of Geodynamics 27, 529-546.