

Geodäsie und Fernerkundung am Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)¹

Harald Schuh, Sibylle Itzerott, Doris Dransch, Frank Flechtner, Christoph Förste,
Hermann Kaufmann, Maik Thomas und Jens Wickert

Zusammenfassung

Um das System Erde und seine Dynamik zu verstehen, müssen die darin ablaufenden Prozesse bekannt sein. Basis dafür sind globale, lange Zeiträume überdeckende Beobachtungsdaten der komplexen Vorgänge auf und innerhalb der Erde. Das GFZ hat eine integrierte boden- und satellitengestützte Geomonitoring-Infrastruktur geschaffen, mit der geodynamische Vorgänge der festen Erde, der Ozeane, der kontinentalen Hydrosphäre und großer Eisflächen erfasst werden können. Diese wird im Verbund mit nationalen und internationalen Partnern operationell betrieben und die damit gewonnenen Beobachtungsdaten werden zum besseren Verständnis des Erdsystems in numerische Modelle eingeführt. Neben der Modellbildung dynamischer vom Erdkern über die Erdoberfläche bis in die obere Atmosphäre reichender Prozesse ist mit dieser globalen Beobachtungsinfrastruktur eine Vielzahl geophysikalischer Untersuchungen möglich.

Summary

To understand the Earth system and its dynamics, all processes and interactions between the various components of the Earth must be known. Basis for obtaining this knowledge are global, long-term observation data of the complex processes on and within the Earth. GFZ has established an integrated ground- and satellite-based geomonitoring infrastructure which is used to determine geodynamic processes of the solid Earth, the oceans, the continental hydrosphere, and large ice surfaces. It is run operationally in cooperation with national and international partners. The observation data gained are entered into numerical models for a better understanding of the Earth system. In addition to the modeling of dynamic processes from the Earth's core reaching over Earth's surface to the upper atmosphere, a variety of geophysical investigations is possible with this global observation infrastructure.

Schlüsselwörter: Fernerkundung, geodätische Weltraumverfahren, Geoinformation, Referenzrahmen, Schwerefeld

1 Kurzer historischer Rückblick

Die Forschungsarbeiten zur Geodäsie auf dem Potsdamer Telegrafenberg gehen bis in das Jahr 1892 zurück. Die wichtigsten Persönlichkeiten, die im Zusammenhang damit genannt werden müssen, sind Johann Jacob Baeyer (1794–1885) und Friedrich Robert Helmert (1843–1917).

Als Generalleutnant Johann Jacob Baeyer 1857 63-jährig als Chef der Trigonometrischen Abteilung im

Preußischen Generalstab aus dem aktiven Dienst ausschied, wandte er sich der Idee zu, die geodätischen Vermessungen aller Länder, mit denen Deutschland in Mitteleuropa zwischen den gleichen Meridianen liegt, zu verbinden und verfasste eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung (Baeyer 1861). Sie bildete den Ausgangspunkt für die 1862 beginnenden internationalen Aktivitäten, die auch als Geburtsstunde der IAG (Internationale Assoziation für Geodäsie) angesehen werden. Zunächst trafen sich die Vertreter Preußens, Österreichs und Sachsen, schon bald bekundeten mehrere andere Regierungen Mitteleuropas ihr Interesse an einer Mitwirkung. 1867 wurde die Organisation nach dem Beitritt zahlreicher Staaten zur »Europäischen Gradmessung« erweitert, 1886 dann zur »Internationalen Erdmessung«. Das gemeinsame fachliche Programm umfasste zunächst geodätische Triangulationen einschließlich Basismessungen, astronomische Ortsbestimmungen sowie Höhenmessungen für Reduktionszwecke (Torge 2009). Hinzu kamen 1867 ausgedehnte Höhenmessungen, flächenhafte Schweremessungen und Wasserstandsmessungen an Küsten. Die wissenschaftliche Leitung lag in den Händen einer Permanenten Kommission, die durch das Zentralbüro unterstützt wurde. Dieses wurde von Baeyer und später von Helmert geleitet, zunächst in Berlin und war Ausgangspunkt für die Gründung eines Geodätischen Institutes.

Nach Baeyers Tod im Jahre 1885 nahmen unter Führung von Helmert, dem neuen Direktor, die Pläne für den Bau eines Institutsgebäudes, das die Beengtheit und messtechnische Unzulänglichkeit der bisherigen in Berlin verteilten Standorte überwinden würde, konkrete Formen an. Als Bauplatz wurde der Telegrafenberg in Potsdam gewählt, wo zuvor schon andere Institute entstanden waren. Die Baupläne des Architekten Paul Emmanuel Spicker (1826–1896) berücksichtigten nach Vorschlägen von Helmert alle Anforderungen an fachgerechte Arbeitsbedingungen der Geodäsie. 1892 zogen Zentralbüro und Institut in das neu geschaffene Ensemble auf dem Telegrafenberg. Diese geodätische Forschungsstätte, ausgestattet mit vielen speziellen Messanlagen für Länge, Winkel, Schwere, astronomische Örter und Zeit war zu dieser Zeit

¹ Detaillierte Ausführungen zu den Forschungsarbeiten im Department 1 des GFZ sind auf der Webseite www.gfz-potsdam.de/forschung/ueberblick/departments/department-1 zu ersehen. Einige Teile des vorliegenden Artikels wurden von dieser Webseite übernommen.

einzigartig in der Welt und wurde weithin als »Mekka der Geodäten« gepriesen (Buschmann 1996 und 1997).

In den Jahren unter Helmerts Leitung weitete sich die wissenschaftliche Ausrichtung des Institutes immer stärker dem Ziel zu, die Erdfigur als Geoid, dem Abbild des Schwerefeldes auf der Oberfläche, zu erforschen und zu beschreiben. Die im Institut tätigen Wissenschaftler – Geodäten, Physiker, Astronomen, Mathematiker – erzielten mit den modernen und theoretisch fundierten experimentellen Anlagen weltweit Aufsehen erregende Ergebnisse und Erkenntnisse. Immer mehr auswärtige Fachkollegen kamen zu Forschungsaufenthalten hierher, die Institutsmitglieder gingen neben den Beobachtungsdiensten auf dem Telegrafenberg selbst auf zahlreiche Messreisen.

Der Name Potsdam ist in der Geodäsie eng verbunden mit der sehr genauen Messung des Absolutwertes der Schwere von $981,274 \text{ cm/s}^2$ durch Kühnen und Furtwängler 1898 bis 1904. Ein Messpfeiler des Geodätischen Instituts wurde daraufhin bis 1971 Welt-Schwerebezugs punkt (Höpfner 2012). Die Namen Helmert und Krüger (Johann Heinrich Louis Krüger 1857–1923) sind verewigt in den Begriffen der Helmert-Transformation für eine Methode des Aneinanderfügens zweier Netze in verschiedenen Koordinatensystemen, der Helmertschen Kondensationsmethode zur Reduktion der Schwerewerte von der Erdoberfläche auf das Geoid und dem Helmert-Ellipsoid für die von ihm 1906 schon sehr genau beschriebene Erdform sowie in der Gauß-Krüger-Projektion für eine Abbildungsvorschrift der gekrümmten Erdoberfläche auf Landkarten zur Vereinheitlichung der Koordinatensysteme in Mitteleuropa. Zu den herausragenden wissenschaftlichen Leistungen des Institutes zählen aber auch die umfangreichen Messungen der Lotabweichung, um daraus die Form des Geoids abzuleiten, die engmaschigen Schweremessungen zu Bestimmung des Schwerefeldes und seiner Anomalien sowie die Messung der periodischen Schwankungen der Polhöhe als Widerspiegelung von Schwankungen der Richtung der Erdrotationsachse. Der Nachweis der Gezeitenwirkung auf das Festland durch Messung der Schwankungen der Lotrichtung und der Schwereintensität ist erstmalig in Potsdam gelungen.

2 Profil des GFZ und Alleinstellungsmerkmale²

Das GFZ hat sich seit seiner Gründung im Jahre 1992, aufbauend auf der Tradition des Standortes Telegrafenberg, zu einem der international führenden Zentren für Geowissenschaften entwickelt. Das GFZ umfasst alle Disziplinen der Geowissenschaften und betreibt die Forschung in einem engen interdisziplinären Verbund mit den benachbarten Naturwissenschaften Physik, Mathematik und Chemie sowie den ingenieurwissenschaftli-

chen Disziplinen Felsmechanik, Bohrtechnik, Ingenieurhydrologie und Ingenieurgeophysik.

Eine hervorgehobene Rolle hat das GFZ unter anderem in folgenden Forschungsthemen:

- Schwer- und Erdmagnetfeld,
- Erforschung und Beobachtung von Erdbeben,
- Entwicklung von Frühwarnsystemen,
- Stoffgesetze und Eigenschaften von Geomaterialien,
- Hochwasserrisiko und globaler Wasserhaushalt,
- Georesourcen und unterirdischer Raum.

Weitere Alleinstellungsmerkmale liegen im Bereich der Infrastruktur und der methodischen Expertise:

- Multidisziplinäre und Langzeitbeobachtungen,
- Satellitenmissionen und Observatorien,
- Geräte- und Methodenentwicklung,
- Wissenschaftliches Bohren,
- Betrieb von Pilotstandorten,
- Fähigkeit zu integrierten Lösungen durch disziplin übergreifende Bearbeitung.

Unter den geowissenschaftlich ausgerichteten Einrichtungen weltweit zeichnet sich das GFZ besonders dadurch aus, dass es mit seinem Forschungsprofil, seiner disziplinären Breite und seiner methodischen Kompetenz den gesamten Bogen von der geowissenschaftlichen Prozessforschung bis hin zur praktischen Anwendung spannt.

3 Die heutigen Arbeiten der Geodäsie und Fernerkundung am GFZ

Der Schwerpunkt der heutigen Arbeiten der Geodäsie liegt darin, die Figur und Rotation der Erde, ihre Orientierung im Raum, ihre Oberfläche und ihr Gravitationsfeld mit deren zeitlichen Veränderungen zu vermessen. Dazu werden am GFZ Messdaten verschiedener nationaler und internationaler Satelliten zur Fernerkundung der Erde aus dem Weltall wie beispielsweise GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) analysiert und interpretiert und es werden neue Satellitenmissionen entwickelt, wie die zukünftigen Satelliten EnMAP (*Environmental Mapping and Analysis Program*) und das Satellitenpaar der GRACE-Nachfolgemission GRACE-FO (*Follow-On*). Neue geowissenschaftliche Anwendungen für Navigations satelliten (GNSS, Global Navigation Satellite Systems; amerikanisches GPS, russisches GLONASS, chinesisches Compass/Beidou) werden entwickelt und erprobt. Auch zum Aufbau des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo trägt das GFZ bei, das schon jetzt für die Geoforschung am GFZ genutzt wird. Messungen von Flugzeugen und bodengestützte geodätische Beobachtungen sowie die Entwicklung und Anwendung entsprechender Auswerteverfahren runden das Spektrum der geodätischen Aufgaben am GFZ ab. Schließlich werden

² Aus dem Strategiepapier des GFZ 2014.

all diese Messungen und Beobachtungen in Computermodellen zusammengefasst. Damit können die dynamischen Vorgänge im Erdinneren, an der Erdoberfläche, in den Ozeanen, in der Atmosphäre und der Kryosphäre simuliert und besser verstanden werden.

Aus hochpräzisen Messungen der Satellitenbahnen kann auf örtliche und zeitliche Veränderungen der Schwerkraft rückgeschlossen werden, die Auskunft über den Aufbau und die dynamischen Veränderungen im Erdinneren und auf der Erdoberfläche geben. Grobräumige Massenverlagerungen, z.B. verursacht durch das Abschmelzen von Eismassen in Grönland und der Antarktis oder durch Veränderungen im kontinentalen hydrologischen Kreislauf, lassen sich so sehr genau quantifizieren.

Neben der hochgenauen Bestimmung von Satellitenbahnen werden am GFZ die Registrierungen von unterschiedlichen Sensoren auf zahlreichen Satelliten ausgewertet. Dazu gehört die präzise Vermessung von Meeres- und Eisoberflächen mit dem Verfahren der Satelliten-Altimetrie. Die Messungen zu den GNSS-Satelliten inkl. der künftigen Galileo-Satelliten, Laserentfernungsmessungen zu Erderkundungssatelliten (engl. *Satellite Laser Ranging*, SLR) und die sog. Radiointerferometrie auf langen Basisslinien (engl. *Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) liefern Informationen über die Figur der Erde, die Bewegungen der tektonischen Platten und über die so genannten Erdorientierungsparameter. Eine wichtige Aufgabe ist dabei die Realisierung eines weltweiten Referenzrahmens, der notwendig ist, um beispielsweise die präzise Messung des globalen Meeresspiegelanstiegs zu ermöglichen. Aus diesen vielfältigen geodätischen Beobachtungen lassen sich aber auch Informationen über den Zustand der Atmosphäre ableiten, die vom Department 1 für die tägliche Wettervorhersage bereitgestellt werden. Außerdem werden Aufnahmen von Fernerkundungssatelliten ausgewertet, unter anderem, um die Auswirkungen des Klimawandels zu verstehen und Strategien zur Risikominderung bei Naturkatastrophen zu erarbeiten.

Im Zusammenspiel geben all diese Messungen ein dynamisches Gesamtbild vom sehr komplexen System Erde, dessen Geschichte und künftige Entwicklung mit den gesammelten Messwerten in Computern modelliert werden. Unsere Modellrechnungen reichen dabei von der Dynamik des Erdkerns und der Erdoberfläche bis zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre, den Weltmeeren und der festen Erde. Die Daten, wie auch die geowissenschaftlichen Ergebnisse, werden mit den modernsten Methoden der Geoinformationsverarbeitung untersucht, analysiert, visualisiert und weiteren Nutzern zur Verfügung gestellt.

Ein wichtiger Bestandteil der Arbeiten zur geodätischen Wissenschaft und Forschung am GFZ besteht im Betrieb verschiedener Infrastruktureinrichtungen wie der Potsdamer SLR-Station und zahlreichen GNSS-Stationen auf der ganzen Welt sowie im Beitrag zu den Internationalen Diensten der IAG. Hier ist das GFZ wichtiger Partner in insgesamt zehn solchen Diensten, die heutzutage eine unverzichtbare Leistung in der Bereitstellung geodätischer Produkte erbringen, wie z.B. den hochgenauen Bahnen und Uhren der GNSS-Satelliten und dem stabilen mit Millimetergenauigkeit ermittelten globalem terrestrischen Referenzrahmen, dem ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*).

Im Rahmen der programmorientierten Förderung der Helmholtz Gemeinschaft trägt das Department 1 des GFZ zu den Programmen »Geosystem: Erde im Wandel« und »Atmosphäre und Klima« im Forschungsbereich »Erde und Umwelt« bei.

Die Forschung des Departments 1 ist in fünf Sektionen gegliedert (siehe www.gfz-potsdam.de/forschung/ueberblick/departments/department-1):

Sektion 1.1: GPS/Galileo-Erdbeobachtung,
Sektion 1.2: Globales Geomonitoring und Schwerefeld,
Sektion 1.3: Erdsystem-Modellierung,
Sektion 1.4: Fernerkundung,
Sektion 1.5: Geoinformatik,

deren Forschungsschwerpunkte im Folgenden beschrieben werden sollen.

3.1 GPS/Galileo-Erdbeobachtung

Die Satellitennavigation gehört heute ebenso zum Alltag wie das Handy oder Internet. Mit den Navigationssatelliten lassen sich aber nicht nur Positionen und Geschwindigkeiten berechnen. Bereits in den 1980er Jahren wurde das Potenzial der kontinuierlich und weltweit verfügbaren Signale für verschiedenste geowissenschaftliche Anwendungen erkannt. Die Sektion 1.1 versteht und nutzt die Satellitensysteme GPS, GLONASS, Galileo und Beidou als äußerst leistungsfähige und vielseitige Werkzeuge der Geoforschung speziell zur Beobachtung des komplexen Erdsystems. Das Spektrum der damit verbundenen Forschungsarbeiten ist dabei ebenso vielfältig. Es reicht von der hochgenauen Messung der Bewegung von tektonischen Platten mit mm/Jahr-Genauigkeit, über die regionale und globale Sondierung der Atmosphäre und Ionosphäre bis hin zur Fernerkundung von Ozean- und Eisoberflächen und Untersuchungen zu zukünftigen satellitenbasierten Frühwarnsystemen. Zusätzlich werden gemeinsam mit der Industrie spezielle Satellitennavigationsempfänger und Auswertesoftware für geowissenschaftliche Anwendungen entwickelt.

Ausbreitungseffekte von GNSS-Signalen beim Durchgang durch die Atmosphäre werden entsprechend der Prinzipskizze in Abb. 1 genutzt, um Temperatur- und Wasserdampfinformationen abzuleiten. Diese mittlerweile etablierte Fernerkundungstechnik wird operationell am GFZ eingesetzt, um regionale und globale Wettervorhersagen zu verbessern.

Das Rückgrat für die bodengestützten Aktivitäten des GFZ bildet die operationelle Analyse von derzeit ca. 350 GNSS-Bodenstationen in Deutschland zur Ableitung

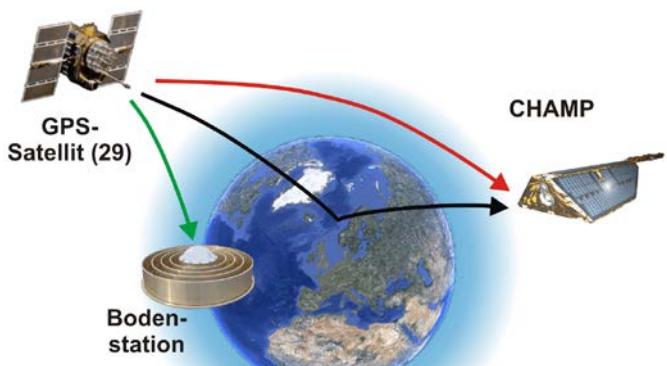


Abb. 1: Prinzipskizze GPS-basierter Methoden zur Atmosphärensondierung. Die Signale der GPS-Satelliten werden beim Durchgang durch die Atmosphäre verändert (Strahlbeugung und Wegverlängerung). Die Veränderungen sind von Atmosphäreneigenschaften, wie Temperatur oder Wasserdampfgehalt, abhängig. Genutzt werden GPS-Messungen von Bodenstationen (grün) und Satelliten (z.B. CHAMP, Satellitenuntergänge, Radiookkultation, rot). Zusätzlich werden von Wasser- und Eisoberflächen reflektierte GPS-Signale (schwarz) für die Fernerkundung genutzt.

des integrierten Wasserdampfes über den Stationen (Gendt et al. 2004). Die Analysen werden echtzeitnah mit 15-minütiger Auflösung maximal eine Stunde nach der Messung mit einer Genauigkeit von $\pm 1\text{--}2\text{ mm}$ bereitgestellt. Die GNSS-Daten haben eine deutlich bessere raumzeitliche Auflösung als alle vergleichbaren Messverfahren in Deutschland und werden deshalb für unterschiedlichste Anwendungen in Wettervorhersage, Atmosphären- und Klimaforschung genutzt. Mit tomografischen Verfahren können auch dreidimensionale Wasserdampfverteilungen

abgeleitet werden (s. Abb. 2, Bender et al. 2011). Aktuelle Untersuchungen beschäftigen sich mit der Bereitstellung von Echtzeit-Datenprodukten (Li et al. 2014).

Der zweite Schwerpunkt der GNSS-Atmosphärensondierung am GFZ ist die operationelle Auswertung von GNSS-Radiookkultationsdaten (RO) verschiedener Satellitenmissionen (derzeit: GRACE, TerraSAR-X, TanDEM-X, FORMOSAT-3/COSMIC und Metop; Wickert et al. 2009). Diese Missionen stellen Daten für ein globales Monitoring der Atmosphäre/Ionosphäre bereit. Haupteigenschaften sind dabei hohe Genauigkeit, verbunden mit einer hohen vertikalen Auflösung; weiterhin Langzeitstabilität und Wetterunabhängigkeit als Basis für eine Vielzahl von Anwendungen in der Atmosphärenforschung.

Die wohl wichtigste Anwendung ist die operationelle Nutzung der GRACE- und TerraSAR-X-Daten des GFZ zur Verbesserung globaler Vorhersagen aller weltweit führenden Wetterzentren (Wickert 2010). Ein anderer Schwerpunkt ist die Klimaforschung, z.B. die Untersuchung globaler atmosphärischer Temperaturänderungen, die aus GNSS-RO-Messungen abgeleitet wurden (Schmidt et al. 2010).

Ein weiteres Ziel der Sektion ist die mm-genaue Bestimmung der Deformationen der Erdoberfläche mit GNSS-Messungen. Dazu werden die Daten des globalen Bodennetzes des IGS (Internationaler GNSS-Dienst) genutzt. Hinzu kommen verstärkte Aktivitäten in geowissenschaftlichen Schlüsselregionen, wie z.B. an den Rändern der tektonischen Platten. Fast alle Erdbeben und Vulkanausbrüche finden dort statt. Die Westküste von Südamerika gilt als die Region der Erde, an der ein aktiver Kontinentalrand am besten studiert werden kann. Deswegen wird dort ein internationales Observatorium zur Untersuchung von Erdbeben und deren Entstehung mit prägender Beteiligung des GFZ betrieben (IPOC, International

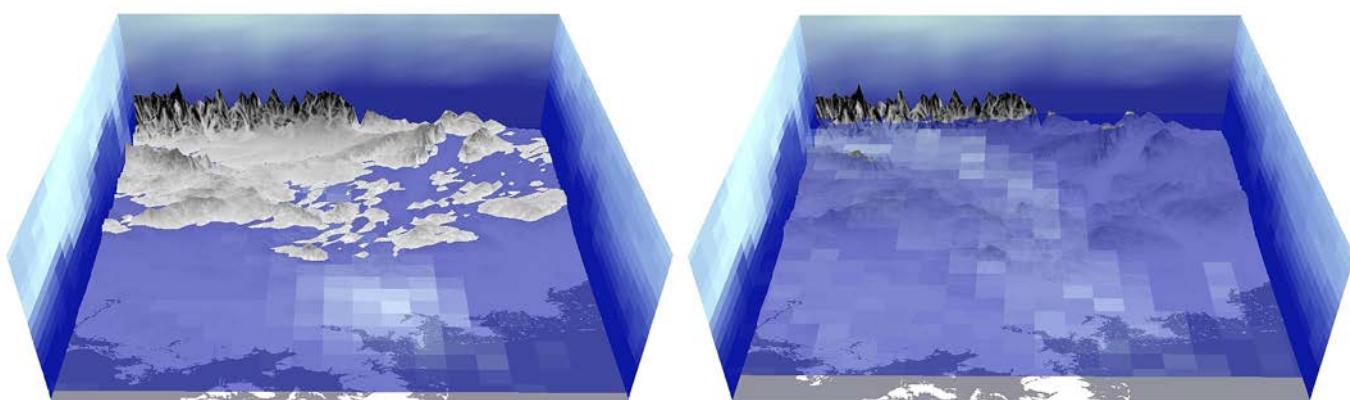


Abb. 2: Beispiel für eine 3D-Wasserdampfverteilung über Deutschland vom 6. August 2007, abgeleitet aus Messungen von ca. 350 GPS-Bodenstationen mit tomografischen Verfahren (Oben: Alpen; unten: Ostsee). Dargestellt sind zwei horizontale Schnitte durch die 3D-Verteilung, links in 300 m und rechts in 1.000 m Höhe. Die Verteilung wird auf einer räumlichen Gitterstruktur mit einer Auflösung von $35\text{ km} \times 35\text{ km}$ in der Horizontalen und ca. 300 m in der Vertikalen erstellt. Die Farbtiefe ist proportional zum Wasserdampfgehalt, von weiß (trocken) bis dunkelblau (sehr feucht). Die linke und rechte Begrenzung der Abbildungen sind jeweils Vertikalschnitte durch die 3D-Rekonstruktion. Die zeitliche Veränderung dieser Verteilung ist mit Wetterphänomenen gekoppelt und kann zur Wettervorhersage genutzt werden.

Plate Boundary Observatory Chile). GNSS-Messungen eines dichten, über ganz Chile verteilten Bodennetzes, spielen dabei eine Schlüsselrolle. An der Sektion 1.1 wird deswegen ein Analysezentrum zur Bereitstellung von hochgenauen Koordinaten und Bewegungsvektoren dieser Stationen aus deren GNSS-Daten betrieben. Derartige Daten sind derzeit auch Schlüsselkomponenten von Frühwarnsystemen, wie z.B. des deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnsystems (GITEWS), an dessen Entwicklung Wissenschaftler des GFZ wesentlich beteiligt waren.

Die GNSS-Signale im Gigahertz-Frequenzbereich (L-Band) werden von Wasser-, Eis- und feuchten Landoberflächen reflektiert. In der Sektion 1.1 wird dieser Effekt genutzt, um geophysikalische Parameter der reflektierenden Oberflächen, wie altimetrische Höhe, Rauigkeit oder Bodenfeuchte abzuleiten. Eine Vision der Wissenschaftler ist die Anwendung dieser Methode an Bord von erdumlaufenden Satelliten, um globale Informationen über Ozeanoberflächen, wie Meereströmungen oder auch Windgeschwindigkeit und -richtung zu gewinnen. Das Potenzial dieser relativ neuen und sehr innovativen Fernerkundungsmethode ist noch lange nicht ausgeschöpft. Deshalb wird versucht, die Methoden mit umfangreichen bodengestützten Messungen und Flugexperimenten zu verbessern und weiter zu entwickeln (Semmling et al. 2014). Die Sektion 1.1 ist dabei federführend an der Vorbereitung von GNSS-Reflektometrieexperimenten an Bord von Kleinsatelliten und auch der internationalen Weltraumstation ISS beteiligt (Wickert et al. 2011).

In der Sektion wird ein Analyse- und Datenzentrum des IGS betrieben. Verschiedene geodätische Datenprodukte werden von mehr als 10.000 weltweit verteilten Anwendern genutzt, z.B. hochgenaue Stationskoordinaten oder GPS/GLONASS/Galileo-Satellitenbahnen- und -uhreninformationen. Um das Genauigkeitspotenzial der Satellitenpositionierung bis hin zum mm-Bereich, u.a. auch für Echtzeitanwendungen, auszuschöpfen, wird die GFZ-eigene Analysesoftware »EPOS« ständig weiterentwickelt.

Die Radiointerferometrie auf langen Basislinien (VLBI) ist ein hochgenaues Weltraumverfahren, das seit den 1970er Jahren in der Astrophysik wie auch in der Geodäsie eingesetzt wird und bahnbrechende wissenschaftliche Erkenntnisse geliefert hat. So können z.B. weltweite Entfernung und deren zeitliche Veränderungen mit mm-Genauigkeit gemessen werden; die VLBI trägt wesentlich zum globalen terrestrischen Referenzrahmen (ITRF) bei und liefert als einziges der geodätischen Welt Raumverfahren den Bezug zum himmelfesten Referenzrahmen (*International Celestial Reference Frame*, ICRF) sowie alle Erdorientierungsparameter (Polbewegung, Weltzeit, Präzession/Nutation). Ein Schwerpunkt der Forschung zur VLBI in der neugegründeten Arbeitsgruppe am GFZ besteht in der Beobachtung von Radiosonden und Satelliten mit VLBI-Radioteleskopen. Ziel ist die Verknüpfung des ITRF und des ICRF mit den dynamischen Referenzrahmen der künstlichen Sonden und Satelliten

und letztendlich eine Verringerung systematischer Fehler, z.B. in den Satellitenbahnen.

3.2 Globales Geomonitoring und Schwerefeld

Das primäre Forschungsfeld der Sektion 1.2 ist die präzise Vermessung der Figur der Erde und ihres statischen und zeitvariablen Schwerefeldes (Details siehe Förste 2013). Dazu werden moderne Schwerefeld-Satellitenmissionen wie CHAMP, GRACE, GOCE oder GRACE-FO entwickelt, betrieben und analysiert sowie terrestrische und flugzeuggestützte Gravimetriedaten für regionale Auswertungen oder die Berechnung von höchstauflosenden Schwerefeldmodellen in Kombination mit Satellitedaten (Shakó et al. 2014) verwendet. Die LAGEOS- und LARES-Satelliten werden dabei für die Bestimmung der langwelligen Anteile des Schwerefeldes aber auch der Koordinaten global verteilter SLR-Bodenstationen oder die Untersuchung von relativistischen Effekten (Ciufolini et al. 2012) benutzt.

Für die präzise Bahnbestimmung verschiedener tief fliegender (*Low Earth Orbiting*, LEO) Satelliten werden Beobachtungen zu GNSS-Satelliten ausgewertet. Zudem betreibt das GFZ eine SLR-Station, die millimetergenaue Entfernungsmessungen zu einer Vielzahl von Raumflugkörpern in niedrigen, mittleren und hohen Umlaufbahnen durchführt. Diese Station ist Teil des weltweiten Netzwerkes derartiger Observatorien, die innerhalb des *International Laser Ranging Service* (ILRS) organisiert sind. Aus der Beobachtung der Dynamik von Satellitenbahnen werden Erdsystemparameter wie die geometrische und dynamische Figur der Erde (Koordinaten von Bodenstationen oder sphärisch harmonische Koeffizienten des Schwerefelds) und ihre Orientierung im Raum (Erdorientierungsparameter) geschätzt. Weiterhin betreibt das GFZ eine Satelliten-Empfangsstation in Ny-Ålesund auf Spitzbergen für den Datenempfang von Erdsatelliten auf nahezu polaren Umlaufbahnen wie z.B. GRACE, TerraSAR-X oder TanDEM-X. Aufgrund der hohen geografischen Breite der Station können Daten dieser Satelliten bei nahezu jedem Umlauf empfangen werden. Dies ermöglicht sowohl den schnellen Zugriff auf die Daten als auch eine kontinuierliche Überwachung des Betriebszustandes der Satelliten (Details siehe www.gfz-potsdam.de/srs-nya).

Weiterhin werden historische und aktuelle Altimetriesatellitenmissionen ausgewertet, um Meeresspiegeltrends abzuleiten. Dazu wird ein Netz von Pegelstationen an Küsten sowie GNSS-Bojen auf offener See betrieben. Die Analyse der Messdaten erlaubt es, die Beobachtungen der Altimetriesatelliten zu kalibrieren und damit Langzeitveränderungen im Meeresspiegel aufzudecken (Schön et al. 2010).

In enger Zusammenarbeit mit den lokalen und nationalen Einrichtungen hat das GFZ in den letzten Jahren Frühwarnsysteme entwickelt, implementiert und betrieben, z.B. das in 3.1 bereits erwähnte GITEWS in Indone-

sien (Schöne et al. 2011) oder im Oman und trägt damit zur Beobachtung von globalen und lokalen Risiken bei. Dazu werden in der Sektion mit GNSS und verschiedenen anderen Sensoren bestückte Bojen auf hoher See sowie GNSS-kontrollierte Pegel ausgewertet und es wurde ein Nahezu-Echtzeit-System zur Aufdeckung von horizontalen und vertikalen Verschiebungen entwickelt, das die durch Erdbeben verursachte Bodenbewegungen aufdecken kann (Falck et al. 2010). Zusätzlich wurden kleine und leichtgewichtige Flussbojen zur Überwachung von Überflutungen entwickelt, die z.B. im Mekong-Bassin eingesetzt werden.

Schließlich trägt das GFZ zu Errichtung und Betrieb eines hydrometeorologischen Netzes in Zentralasien und zum *Global Change Observatory* des GFZ auf Gletschern in Zentralasien durch Design, Installation und Betrieb eines hydrologischen Beobachtungssystems in dieser Region bei (Schöne et al. 2013).

Das momentan wichtigste und international sichtbarste Projekt der Sektion besteht im Betrieb und der Auswertung der GRACE-Mission sowie in der Realisierung einer Nachfolgemission (*Follow-On*) GRACE-FO zusammen mit der NASA (Flechtner et al. 2014).

Das Satellitenpaar GRACE (Tapley et al. 2004) startete am 17. März 2002. Ziel ist die Vermessung der Erdanziehungskraft und erstmals auch ihrer zeitlichen Veränderung mit bisher unerreichter Genauigkeit. GRACE erforscht zudem die Atmosphäre mit dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Verfahren der Atmosphärensondierung und gibt dadurch Auskunft über ihre vertikale Temperaturverteilung und ihren Wasserdampfgehalt. Die Mission besteht aus zwei baugleichen Satelliten, die mit einem Abstand von etwa 220 km auf der gleichen Umlaufbahn um die Erde fliegen (Abb. 3). Die Satelliten hatten eine Anfangsflughöhe von 500 km (momentan 410 km) und umrunden die Erde in etwa 95 Minuten auf einer nahezu polaren Bahn. Die Mission ist ein Gemeinschaftsprojekt mit der amerikanischen Weltraumbehörde NASA und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die wissenschaftliche Datenauswertung erfolgt durch das GFZ sowie beim Center for Space Research der Univer-



Abb. 3: Das Satellitentandem GRACE

© Astrium/GFZ

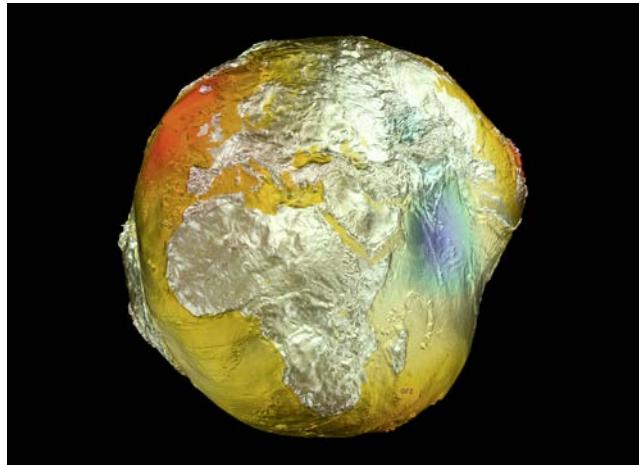


Abb. 4: Das Schwerefeld der Erde, abgeleitet aus terrestrischen Messungen und Satellitendaten

sität Austin, Texas und beim Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, Kalifornien.

Wie bei der Vorgängermission CHAMP ist jeder der beiden GRACE-Satelliten mit einem GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung, einem im Vergleich zu CHAMP zehnmal genaueren Beschleunigungsmesser zur Korrektur von Störbeschleunigungen durch die Restatmosphäre und die Sonneneinstrahlung sowie zwei Sternsensoren zur Bestimmung der Satellitenorientierung im Raum ausgerüstet. Herzstück der Instrumentierung ist das ultrapräzise K-Band-Abstandsmesssystem. Zur Vervollständigung der Instrumente hat das GFZ für jeden der beiden Satelliten einen Laser-Retroreflektor gefertigt und beige stellt. Damit kann die Entfernung zwischen der Erdoberfläche und den Satelliten mittels SLR auf wenige Millimeter genau bestimmt werden, was der unabhängigen Überprüfung der mit den GPS-Daten errechneten Satellitenbahnen dient.

Da die Anziehungskraft eines Körpers von seiner Masse abhängt, bedingt die ungleiche Massenverteilung unseres Planeten ein ungleichförmiges Feld der Gravitation (Abb. 4). Die hintereinander fliegenden GRACE-Satelliten werden daher, zeitlich etwas versetzt, manchmal stärker und manchmal schwächer angezogen. Dies zeigt sich in der Distanz zwischen den Satelliten unmittelbar in einer kleinen Entfernungsänderung. Durch die hochpräzise, kontinuierliche Messung dieser Abstandsänderung mit einer Genauigkeit von einigen tausendstel Millimetern (etwa dem Zehntel des Durchmessers eines menschlichen Haars) bei einem Abstand von 220 km können somit auch geringste Massenunterschiede erfasst werden. Damit ist es mit GRACE-Daten erstmals möglich, auf monatlicher Basis Massenveränderungen im System Erde mit einer räumlichen Auflösung von etwa 300 bis 500 km zu beobachten (Details siehe www.gfz-potsdam.de/grace).

Viele Prozesse im Klimageschehen unseres Planeten sind von weit reichenden Wassermassentransporten begleitet: Ozeanströmungen transportieren Wärme in Richtung der Pole und Kälte in Richtung Äquator; die Ab- oder Zunahme der Eis- und Schneemassen, z.B. in

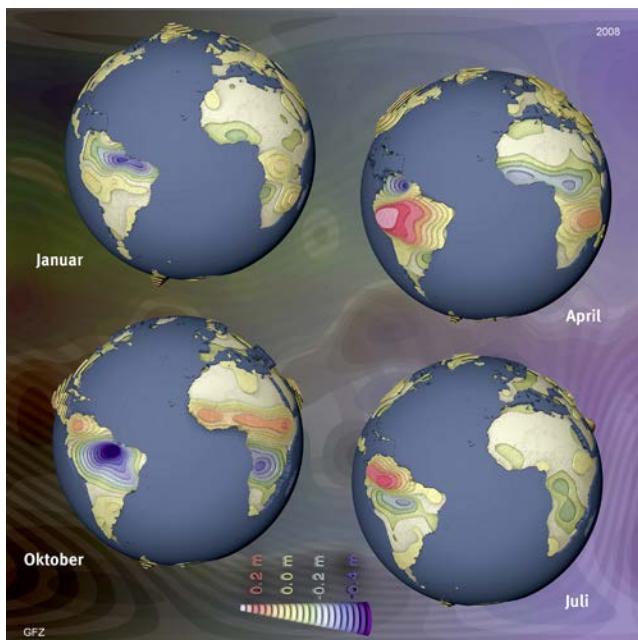


Abb. 5: Jahreszeitliche Schwankungen im weltweiten Wasserhaushalt abgeleitet aus GRACE-Beobachtungen

den Pol- oder großen Gletschergebieten, sind wichtige Faktoren im Klima; hinzu kommen Schwankungen des mittleren Meeresspiegels. Die größten zeitlichen Änderungen des Schwerkraftfeldes werden jedoch durch den Transport von Wassermassen auf den Landflächen der Erde verursacht (Abb. 5). Der kontinentale Wassergehalt ist eine Bilanz zwischen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicherung, die jahreszeitabhängig ist. Umfassend wie bei keinem anderen boden- oder satellitengestützten Beobachtungssystem bilden die Abstandsänderungen der beiden GRACE-Satelliten die Speicheränderungen im Grundwasser, im Boden, in der Schneedecke und in Flüssen, Seen sowie Überflutungsgebieten ab. Die Analysen von GRACE-Daten zeigen, wie sich die Variabilität der klimatischen Bedingungen (z.B. Niederschlag) auf jahreszeitliche und jährliche Variationen der Wasserspeicherung in großen Flusseinzugsgebieten weltweit auswirkt (Güntner et al. 2007). Unter Berücksichtigung weiterer Beobachtungsdaten ist so beispielsweise auch die Überflutungsdynamik in Oberflächengewässern erfassbar. Außerdem können großräumige hydrologische Modelle überprüft und angepasst werden, um ihre Prognosefähigkeit für klimabedingte Änderungen des globalen und regionalen Wasserkreislaufs zu erhöhen (Werth und Güntner 2010).

GRACE war am 17. März 2014 bereits zwölf Jahre im Weltall und arbeitet damit bereits mehr als doppelt so lange wie ursprünglich geplant. Ein Ende der Mission ist mit Blick auf die technischen Bedingungen gleichwohl absehbar. Da insbesondere lange Zeitreihen zuverlässige Aussagen über globale Trends im Klimageschehen liefern können, plant und realisiert das GFZ bereits seit 2011 gemeinsam mit der NASA eine Nachfolgemission GRACE-FO (GRACE Follow-On), die im Sommer 2017 gestartet werden soll. Auf diesem mit GRACE nahezu iden-

tisch aufgebautem Satellitenpaar, soll neben dem auf GRACE erprobten Mikrowellenlink zusätzlich ein sogenanntes Laser Ranging Interferometer als Demonstrationsexperiment mitgeflogen werden. Dieses neuartige Entfernungsmessgerät, das zur Zeit gemeinsam mit dem Jet Propulsion Laboratory der NASA in Deutschland entwickelt und gebaut wird, soll die Verbesserung der Abstandsmessung um etwa eine Größenordnung und dadurch eine höhere räumliche aber auch zeitliche Auflösung in der Schwerkraftberechnung ermöglichen (Sheard et al. 2012). Dies wird zu einem besseren Verständnis des Klimageschehens und seiner Abhängigkeit von relevanten Erdsystem-Parametern beitragen.

3.3 Erdsystem-Modellierung

Die mit satelliten-, flugzeug- und bodengestützten Methoden mit stetig zunehmender Präzision gemessenen räumlichen und zeitlichen Variationen des Schwerkraft- und Erdmagnetfeldes, Deformationen der Erdoberfläche, Änderungen des Meeresspiegels sowie Schwankungen des Erdrotationsvektors sind in dem Sinne von integralem Charakter, als dass sie das Resultat vieler verschiedener, gleichzeitig ablaufender Prozesse reflektieren, die im Zusammenhang mit Energie-, Impuls- und insbesondere Massentransporten im Erdsystem stehen. Zur Identifikation der für die beobachteten integralen Veränderungen verantwortlichen Mechanismen und damit zur Interpretation derartiger geodätisch-geophysikalischer Messdaten sind deshalb komplementäre Methoden aus Theorie und Modellbildung notwendig. Übergreifendes Ziel der Modellierungsaktivitäten ist es, mittels numerischer Simulationen einerseits diese auf sehr unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen wirkenden Einflüsse zu separieren und andererseits die geodätisch-geophysikalischen Monitoringdaten zur Verbesserung der numerischen Modelle zu nutzen. Dies erfordert die komplementäre Verwendung von »freien« Vorwärtsmodellen, in denen keine Messdaten eingespeist werden, und datengestützten Modellansätzen, in denen die Modelle an Beobachtungsdaten, beispielsweise mittels Kalman-basierter oder adjungierter Methoden, assimiliert werden.

Wenngleich die unmittelbaren Auswirkungen geosphärischer Prozesse zumeist von regionalem Charakter sind, können sie nur in einem globalen Kontext verstanden werden, weshalb zur Interpretation der genannten geodätisch-geophysikalischen Messgrößen überwiegend globale Modellansätze zum Einsatz kommen. Die Modellierungen lassen sich entsprechend der relevanten Teilsysteme in vier Hauptthemenfelder gliedern, wobei diese nicht voneinander unabhängig behandelt werden, sondern entweder über dynamische Kopplungsalgorithmen oder wechselseitige Bereitstellung von Rand- und Anfangsbedingungen miteinander verknüpft sind.

Massenumverteilungen in der Atmosphäre, den Ozeanen und der kontinentalen Hydrosphäre beeinflussen die

geodätischen Observablen auf Zeitskalen von Stunden bis hin zu mehreren Dekaden. Dieses zeitlich breitbandige Spektrum erfordert die Nutzung von unterschiedlichen numerischen Modelldaten, um einerseits hochfrequente Variationen in den Rohbeobachtungen zur Vermeidung von Aliaseffekten zu korrigieren und andererseits unterschiedliche Beobachtungsgrößen über mehrere Jahre oder sogar Dekaden hinweg gemeinsam zu interpretieren.

Analysen atmosphärischer Variabilität gründen vornehmlich auf Daten des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF). Zur Beschreibung der kontinental-hydrologischen Dynamik werden Simulationen mit dem *Land Surface Discharge Model* (LSDM) durchgeführt, das mit ECMWF-Daten angetrieben wird. Das als Bodenwasser, in Aquiferen oder in Oberflächengewässern gespeicherte Wasser verursacht über Auflastwirkungen elastische Deformationen der Erdkruste und damit verbundene zeitliche Variationen des Erdschwerefeldes (Dill und Dobslaw 2013). Die hydrologischen Simulationen werden insbesondere genutzt, um die klimatologisch relevanten Signale von zufälligen und systematischen Fehlern der verschiedenen geodätischen Mess- und Auswerteverfahren zu separieren.

Zur Interpretation und Korrektion von ozeanischen Bodendruck- und Meeresspiegelvariationen dienen Simulationen mit dem Ozeanmodell für Zirkulation und Gezeiten (OMCT; Thomas et al. 2001). Daten von OMCT-Simulationen mit atmosphärischen Antriebsdaten aus operationellen ECMWF-Analysen kommen gegenwärtig als Standard-Hintergrundmodell in der GRACE- und GOCE-Schwerefeldprozessierung zum Einsatz (Dobslaw et al. 2013). Zudem werden geodätische Observablen mittels assimilativer Verfahren in das globale numerische Ozeanmodell OMCT und das regionale Ozeanmodellsystem ROMS eingespeist, um einerseits die Konsistenz verschiedenartiger Beobachtungsgrößen, wie beispielsweise Beobachtungen des Schwerefeldes und der Erdrotation, zu prüfen und andererseits die Modelle einschließlich ihrer Prädiktionsfähigkeit zu verbessern (Saynisch und Thomas 2012).

Die Vielfalt der Einfluss nehmenden Faktoren auf geodätische Observablen zeigt sich deutlich am Beispiel der räumlich-zeitlichen Variabilität der Meereshöhen, die mittels Satellitenaltimetrie routinemäßig mit Zentimetergenauigkeit gemessen wird. Neben den Gezeitenkräften von Sonne und Mond sind Impulstransfer infolge Windeinwirkung und atmosphärischer Druckanomalien, Massenflüsse infolge Niederschlag, Verdunstung und kontinentaler Frischwasserzufuhr sowie Energieflüsse infolge Wärmeaustausch maßgeblich für derartige Änderungen der Meereshöhen verantwortlich. Lokal werden die resultierenden Variabilitätsmuster modifiziert durch küstennahen Windstau und – auf langen Zeitskalen – gravitative Wechselwirkungen mit angrenzenden Eismassenverteilungen. Zu den genannten primären Mechanismen kommen vielfältige sekundäre Prozesse, die für Meereshöhenänderungen verantwortlich sind und

insbesondere aus Wechselwirkungen mit der deformierbaren Erdkruste resultieren. In Abb. 6 ist exemplarisch die mittlere Meereshöhenanomalie für September 2006 dargestellt (oben links) sowie die mit dem OMCT-Modell erfolgte Separierung des Signals in den auf thermische und haline Expansion der Wassersäule bedingten sterischen (oben rechts) und den auf Änderungen der Wassermasse zurückzuführenden eustatischen Anteil (unten rechts). Unter der Annahme geostrophischen Gleichgewichtes können letztere massenbedingten Anomalien in Änderungen mittlerer barotroper Ozeanströmungen und den damit verbundenen mittleren Transporten umgerechnet werden (unten links). In meridionaler Richtung sind diese Strömungen maßgeblich an der Advektion tropischer Wassermassen in die gemäßigten und polaren Breiten beteiligt und tragen damit entscheidend zum klimarelevanten ozeanischen Wärmetransport bei.

Um die Einflüsse der Dynamik des tiefen Erdinneren auf die Erdrotation und das Schwerkraftfeld zu erfassen, werden detaillierte Modelle der Erdkerndynamik erstellt und anhand von Beobachtungen validiert. Bei der Untersuchung geophysikalischer Ursachen dekadischer Erdrotationschwankungen werden nach Reduktion oberflächennaher Einflüsse, beispielsweise infolge atmosphärischer und ozeanischer Dynamik, von den beobachteten Erdrotationsparametern signifikante Residuen generiert, die nur durch Prozesse im Erdinneren erklärbar sind. Hierbei spielt der Drehimpulsaustausch zwischen Kern und Mantel über die Kern-Mantel-Kopplung eine maßgebliche Rolle. Die Hypothese interner Ursachen wird durch die Korrelationen zwischen den dekadischen Variationen der Erdrotationsparameter und des geomagnetischen Feldes bestätigt (Hagedoorn et al. 2010). Bisher wurden vornehmlich die elektromagnetische und die topographische Kern-Mantel-Kopplung untersucht, wobei beide Mechanismen signifikante Variationen der Tageslänge und der Polbewegung erzeugen.

Mittels kombinierter Analysen von Schwer-, seismischen und anderen geodätischen, geophysikalischen sowie geologischen Daten werden umfassende Modelle der Lithosphäre und des Erdmantels konstruiert (Stolk et al. 2013, Tesuero et al. 2013). Eine wesentliche Frage hierbei ist, inwieweit diese Modelle in Verbindung mit tektonischen und geodynamischen Prozessen stehen. Im Fokus steht hierbei insbesondere die Dichteverteilung im Erdinneren, da deren Variabilität maßgeblich die gestaltbildenden Prozesse der Erde steuert (Kaban und Trubitsyn 2012). Ein weiteres Ziel ist die Bestimmung der rheologischen und thermischen Strukturen der Lithosphäre, die eine Verbindung zu Oberflächenprozessen liefern, wie beispielsweise solche, die im Zusammenhang mit atmosphärisch-ozeanischer, kontinental-hydrologischer oder kryosphärischer Dynamik stehen.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der numerischen Simulation der transienten Dynamik von Eis und fester Erde einschließlich ihrer klimarelevanten Auswirkungen (Petrusin et al. 2013, Sasgen et al. 2013). Die Untersu-

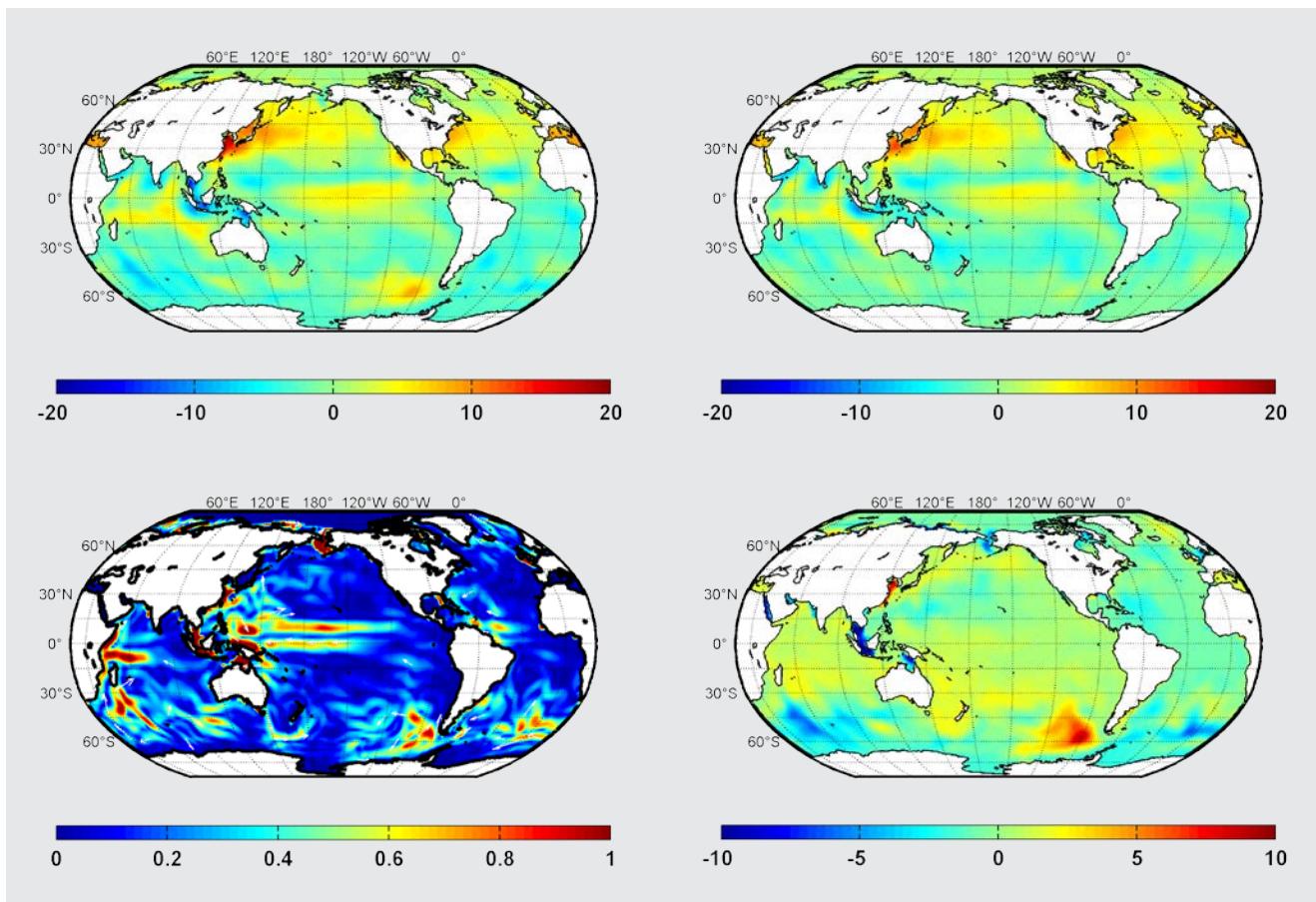


Abb. 6: Anomalie der mittleren Meereshöhen im September 2006 (oben links) sowie die mittels Modellsimulation separierten sterischen (oben rechts) und eustatischen (unten rechts) Beiträge in [cm]. Die eustatischen Anomalien lassen sich transformieren in Änderungen barotroper Ozeanströmungen (unten links, Strömungsbeträge in [m/s]).

chungen reichen von kurzfristigen gegenwärtigen Eismassenänderungen bis zu Vereisungszyklen von vielen tausend Jahren. Um Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen Ozean, Kryosphäre und fester Erde auf kurzen bis hin zu sehr langen Zeitskalen zu erfassen, werden in den Modellen die verschiedenen Teilsysteme gekoppelt. Im Fokus stehen dabei Kopplungsmechanismen wie Oberflächenbelastung, gravitative Anziehung und Austausch von Masse, Impuls und Energie. Signaturen der Prozesse finden sich in langen Zeitreihen geodätischer und geophysikalischer Beobachtungen. Ihre Quantifizierung ist eine essentielle Aufgabe, um andauernde Langzeitprozesse von heutiger anthropogen beeinflusster Dynamik im Erdsystem abzugrenzen. Von globaler Bedeutung ist hierbei vor allem die durch die Eiszeiten verursachte glazial-isostatische Anpassung, die die Reaktion der festen Erde und des Meeresspiegels auf langfristige Vereisungszyklen beschreibt und auch die Reaktion auf die während der letzten Jahrhunderte abschmelzenden Gletscher bis hin zu heutigen Änderungen einschließt (Sasgen et al. 2012). Übergreifendes Ziel ist hierbei, die Vereisungsgeschichte realistisch zu rekonstruieren sowie heutige und zukünftige Änderungen des antarktischen und des grönlandischen Eisschildes vorherzusagen. Da die Dynamik der festen Erde und auch die Eisdynamik primär durch ihre jeweiligen rheologischen Eigenschaften bestimmt wer-

den, fließen in diese Untersuchungen insbesondere Resultate aus den Arbeiten zur Dichtestruktur der Erde ein.

3.4 Fernerkundung

Die wesentliche Aufgabe der Sektion 1.4 besteht in der Definition, Simulation und Validation optischer Sensoren und der Analyse und Auswertung der entsprechenden Daten von Flugzeug- und Satellitenplattformen für umweltrelevante Aufgabenstellungen. Die Arbeiten konzentrieren sich dabei auf die Messung unterschiedlicher Interaktionen der von der Sonne emittierten elektromagnetischen Strahlung auf verschiedenste Oberflächenphänomene unserer Erde. Der untersuchte Wellenlängenbereich reicht vom sichtbaren Licht bis zum kurzweligen Infrarot bei einer spektralen Auflösung im Nanometerbereich. Die Forschungsarbeiten befassen sich dabei mit methodischen Entwicklungen und dienen gleichzeitig dem Bau neuer, innovativer Instrumente, die erheblich zur Beantwortung einer Vielzahl geo-, biowissenschaftlicher Fragestellungen und damit zum besseren Verständnis des Systems Erde beitragen. Vor diesem Hintergrund wurde am GFZ der hyperspektrale Satellitensor EnMAP (Abb. 7) definiert, den die deutsche Bundesregierung im Jahr 2006 genehmigt hat (Kaufmann et al. 2013).

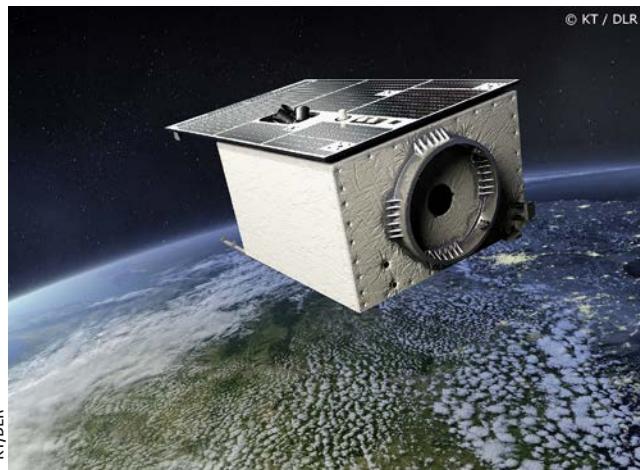


Abb. 7: Der EnMAP Umweltsatellit

Das Instrument (Abb. 7) befindet sich derzeit in der Bauphase und wird 2017/18 gestartet.

In der Anwendung fernerkundlicher Methoden konzentrieren sich die Arbeiten u. a. auf die Beobachtung und Analyse von Bodenentwicklungen, vorrangig in semiariden Bereichen. Mit spektroskopischen Methoden lassen sich dabei Art und Menge verschiedener Minerale in Böden und Gesteinen bestimmen (Chabrillat et al. 2013). So können auch wichtige Informationen für die Rohstoffexploration erfasst werden und begleitende Maßnahmen während der Abbauphase und bei der Beurteilung und Rekultivierung von Abraumhalden in stillgelegten Tagebauen ergriffen werden (Mielke et al. 2014). Des Weiteren unterstützen die durchgeföhrten Studien Stadtplaner bei der Kartierung und Beurteilung von Biotopflächen in besiedelten Gebieten und leisten mit aktuellen Bestandsaufnahmen zur Flächennutzung in der Landwirtschaft einen wichtigen Beitrag in der geoökologischen Forschung (Heiden et al. 2012).

Einen zweiten Schwerpunkt der Sektion bildet die Fernerkundung im Mikrowellenbereich, insbesondere die Radarinterferometrie. Unter Verwendung dieser InSAR-Technologie werden aus Messdaten hochgenaue Deformationskarten berechnet. Durch die komplementäre Analyse mehrerer Radaraufnahmen des gleichen Gebietes können kleinste Deformationen im mm/cm-Bereich an der Erdoberfläche erfasst werden. Somit sind InSAR-Messungen hervorragend geeignet, um Erdbeben und assozierte Deformationen zu messen und zu charakterisieren, wie auch um geringste Hebungen oder Senkungen im Vorfeld vulkanischer Aktivitäten oder Bewegungen von Gletschern und Eisplatten zu erfassen (Motagh et al. 2013). So bietet diese Methodik bei regionalen Naturkatastrophen wie Hangrutschungen und Absenkungen die Möglichkeit, diese genau zu vermessen und leistet damit wertvolle Beiträge zur Risiko- und Schadensminderung (Lubitz et al. 2013).

Bislang vorrangig im Einsatz befindliche multispektrale Sensoren nehmen die von der Erde reflektierte Strahlung in wenigen diskreten Spektralkanälen auf. Sie liefern zuverlässige Daten, wie etwa über die Landbedeckung

und deren räumliche Verteilung. Für die Kartierung bzw. gegenseitige Abgrenzung verschiedener Oberflächenmaterialien wie Vegetationsspezies und diverse lithologische Einheiten oder zur groben Schätzung von Biomasse reichen diese Messmethoden aus. Zur diagnostischen Bestimmung mineralischer Gehalte von Böden und Gesteinen oder zur quantitativen Informationsgewinnung, wie sie zur Ableitung der Nährstoffversorgung von Ackerpflanzen oder zur Bestimmung von Wasserinhaltsstoffen (z. B. Chlorophyll) in Binnen- oder Küstengewässern benötigt wird, sind jedoch spektral hochauflöste Daten erforderlich (Förster et al. 2012).

Diese, auch zur genaueren Prozessanalyse verwendbaren Daten, wird künftig der am GFZ definierte deutsche Erdbeobachtungssatellit EnMAP (*Environmental Mapping and Analysis Program*) den internationalen wissenschaftlichen Nutzern global zur Verfügung stellen. Mit EnMAP kommt eine Reihe von Neuentwicklungen zum Einsatz. Dieses gilt insbesondere für den Detektor im kurzweligen Infrarot-Bereich (SWIR), für verschiedene Stabilitäts- und Genauigkeitsvorgaben an Mechanik, Optik und Elektronik sowie für die *on-board*-Kalibriermöglichkeiten, die eine gleichbleibend hohe Qualität der Daten sicherstellen werden (Segl et al. 2012).

Alle Materialien wie z. B. Pflanzen und Minerale unterscheiden sich durch spezifische, charakteristische spektrale Eigenschaften. Aus diesem Grunde wurde EnMAP mit einem Hyperspektralinstrument ausgestattet, das diesen Anforderungen Rechnung trägt. Dabei wird die gesamte Erdoberfläche bei einer Bodenauflösung von 30 m × 30 m simultan in 240 Farbkanälen mit 10 nm Bandbreite abgetastet. So lassen sich von den aufgezeichneten spektralen Informationen die zur quantitativen Prozessanalyse benötigten biophysikalischen, biochemischen und geochemischen Parameter diagnostisch ableiten.

Mittels verschiedener Auswertemethoden können unter anderem die Schädigung der Vegetation durch Luftsabstoffe, die Nährstoffversorgung landwirtschaftlicher Nutzflächen wie auch die Mineralogie, Feuchte von Böden (Abb. 8) sowie deren mögliche Kontamination bestimmt werden (Chabrillat et al. 2013). Ebenso erfassbar sind Veränderungen in der Zusammensetzung von Wasserinhaltsstoffen der Binnen- und Küstengewässer, zum Beispiel das vermehrte Auftreten von Pigmenten wie Chlorophyll oder Blaualgen. Einen wertvollen Beitrag liefern die Daten von EnMAP im Bereich der geologisch-mineralogischen Kartierung, speziell in Bezug auf Erzlagerstätten (Alterationszonierungen) sowohl bei deren Auffinden, Charakterisierung und Erschließung als auch bei der Beurteilung und dem Management von Abraumhalden und deren umweltschädigendem Potenzial.

Die satellitengestützte Beobachtung durch EnMAP ermöglicht zudem wiederholte Aufzeichnungen derselben Flächenareale mit dem gleichen Messinstrument. Damit lassen sich zeitlich veränderliche Phänomene wie Vegetationszyklen, die Verschiebung von Klimazonen, Erosionsprozesse oder die Verschmutzung von Gewässern gezielt

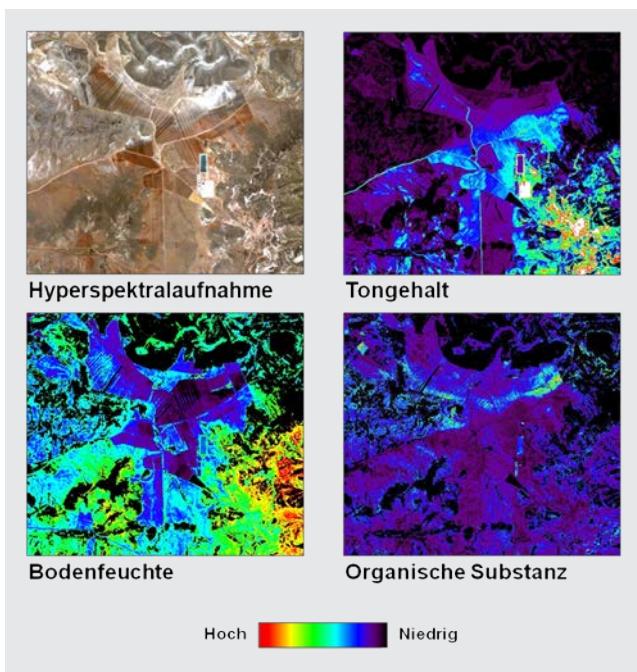


Abb. 8: Ableitung von Bodenkenngrößen aus Hyperspektraldaten im Cabo de Gata-Níjar Natural Park (Südspanien)

erfassen und analysieren. Durch den synergistischen Einsatz von optischen und Mikrowellen-Sensoren unter Verwendung innovativer Modellierungsansätze sind neue, global vergleichbare und aussagekräftigere Ergebnisse zum Zustand unseres Planeten zu erwarten, als sie bislang zur Verfügung stehen.

3.5 Geoinformatik

Den Geowissenschaften steht heute eine vielfältige und stetig wachsende Datenmenge für die Erforschung des Systems Erde zur Verfügung. Dazu gehören Messdaten aus leistungsfähigen Sensornetzen und Satellitenmissionen, Daten aus Experimenten und Geoarchiven sowie Daten, die von Simulationsmodellen erzeugt werden. Das Zusammenführen von Daten aus verschiedenen Quellen und die Analyse umfangreicher, mehrdimensionaler und teilweise unsicherer Daten stellen große Herausforderungen dar.

Hier setzt die Forschung der Sektion 1.5 Geoinformatik an. Im Schnittbereich von Informatik und Geowissenschaften werden Verfahren und Werkzeuge entwickelt, die Geowissenschaftler bei der Auswertung der vielfältigen Daten unterstützen. Die Forschung basiert auf der Idee von »*Data Science*« (Hey et al. 2009), bei der zur Wissensextraktion aus Daten die Methoden und Konzepte verschiedener Disziplinen kombiniert und für die jeweilige Fragestellung angepasst bzw. weiterentwickelt werden. Herangezogen werden Verfahren aus den Bereichen Datenbanken, *Data Mining* und *Machine Learning*, visuelle Datenexploration/*Visual Analytics* sowie Verfahren aus den jeweiligen geowissenschaftlichen Fachdisziplinen.

Mit diesen Entwicklungen werden Geowissenschaftler bei der Beantwortung von vielfältigen Fragen unterstützt. Beispiele dafür sind: Stimmen Ergebnisse aus Simulationsmodellen und Referenzdaten räumlich und zeitlich überein? Welche Beziehungen bestehen zwischen Eingabeparametern und Ergebnissen verschiedener Simulationsläufe? Wie können Informationen aus Sozialen Medien, wie z.B. Twitter, die von der Bevölkerung bereitgestellt werden, für die schnelle Schadenabschätzung nach Naturkatastrophen genutzt werden?

Die Arbeiten der Sektion Geoinformatik gliedern sich in zwei Bereiche: a) *Visual Analytics* Ansätze für die Exploration raumzeitlicher Daten aus Sensoren, Geoarchiven und Simulationsmodellen, und b) Skalierbare Analyseverfahren für große und/oder hochdimensionale Geodaten.

In den letzten Jahren hat sich *Visual Analytics* als Wissenschaftszweig entwickelt, der interaktive Visualisierung vor allem für die visuelle Exploration von Daten nutzt (Thomas and Cook 2005, Keim et al. 2010). Visualisierung wird dabei nicht eingesetzt, um bereits erzielte Ergebnisse zu kommunizieren, sondern um ein besseres Verständnis der Daten und Ergebnisse, wie beispielsweise der Vergleich von Simulations- und Referenzdaten, zu erlangen. Dies ist vergleichbar mit der Nutzung von Karten, die Anwender dabei unterstützen, ein Verständnis über den geografischen Raum zu gewinnen. So wie mit Hilfe von Karten die Art, Lage und Beziehung von Geoobjekten erkannt werden, können mittels interaktiver Visualisierung die Art, Lage und Beziehung von Datenmustern in abstrakten Datenräumen detektiert werden. Oft wird die visuelle Datenexploration durch automatisierte Analyseverfahren aus dem *Data Mining* Bereich ergänzt, insbesondere bei der Exploration großer und/oder hochdimensionaler Daten (Han and Kamber 2006). *Visual Analytics* kombiniert also die Leistungsfähigkeit des Menschen in der Erkennung von Mustern mit der Leistungsfähigkeit des Computers, schnelle Berechnungen durchzuführen.

Ein Beispiel für die Anwendung von *Visual Analytics* ist der Vergleich von Daten aus Simulationsmodellen und Observationen, um die Güte eines Simulationsmodells zu bestimmen und die Modellentwicklung zu unterstützen. In unserem Beispiel werden Daten aus dem globalen Ozeanmodell für Zirkulation und Gezeiten (OMCT, siehe Abschnitt 3.3) mit Daten aus Satellitenbeobachtungen verglichen. Die Modelldaten liegen als *Grid* vor; jeder *Grid*-Punkt hat eine geografische Koordinate und eine Zeitreihe der dort gemessenen Werte der Meeresspiegelauslenkung. Die Gesamtdatenmenge beträgt 10.000 *Grid*-Punkte mit je 900 Zeitschritten pro Zeitreihe. Die Modell- und Observationsdaten müssen in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität verglichen werden. Dazu wurde ein *Visual Analytics* Ansatz entwickelt, der folgende drei Komponenten beinhaltet (Abb. 9): a) Eine *Clustering*-Komponente, die alle Zeitreihen der Modell- bzw. Observationsdaten entsprechend der vom Geowissenschaftler ausgewählten Maße zur Beschreibung der

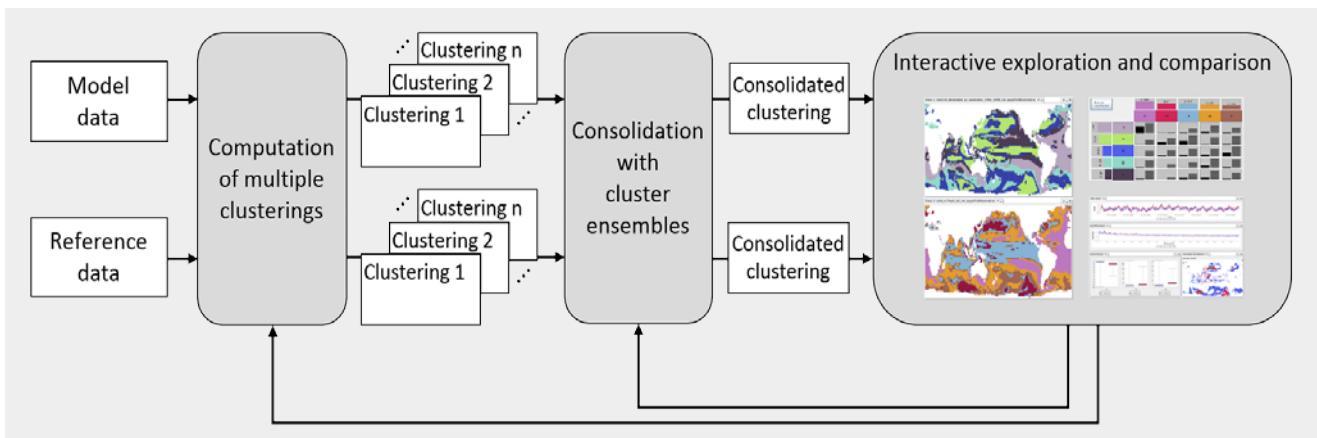


Abb. 9: Komponenten des Visual Analytics Tools zum Vergleich von Modelldaten und Referenzdaten

Variabilität gruppiert. b) Eine Konsolidierungskomponente, die die vielen unterschiedlichen *Cluster* in ein konsolidiertes *Clustering* zusammenführt. Dieses konsolidierte *Clustering* liefert eine Gesamtsicht auf die mit den ausgewählten Maßen berechnete Variabilität sowohl für die Modell- als auch die Observationsdaten. c) Ein visuelles *Explorationstool*, mit dem das konsolidierte *Clustering*-Ergebnis untersucht und einzelne Gruppen miteinander verglichen werden können. Das *Visual Analytics Tool* bietet mit seinen drei Komponenten Wissenschaftlern die Möglichkeit, nicht nur eine Teilmenge der Daten zu betrachten sondern die Gesamtheit aller Modell- und Observationsdaten in die Analyse einzubeziehen. Der Wissenschaftler erhält ein umfassendes Bild über die Variabilität der Daten und dadurch auch über die Unterschiede von Modell- und Observationsdaten. Das *Visual Analytics Tool* ist eine Weiterentwicklung der bisher in der Sektion Geoinformatik entwickelten Verfahren zur visuellen Exploration großer Zeitreihen und zum Vergleich heterogener Modell- und Observationsdaten (Unger et al. 2012, Dransch et al. 2013, Köthur et al. 2014).

Der zweite Forschungsschwerpunkt der Sektion Geoinformatik ist die Entwicklung neuer Verfahren für die schnelle Analyse großer Datenmengen. Ein Ziel dabei ist, bewährte Verfahren aus der Informatik und den Geowissenschaften an die Anforderungen großer und komplexer Datenmengen anzupassen (Köthur et al. 2013). Es wurde ein Verfahren zur effektiven Kodierung von Geodaten entwickelt, das ein schnelles *Clustering* und damit auch die schnelle Detektion interessanter räumlicher Zustände ermöglicht.

Ein zweites Beispiel ist die schnelle RQA-Analyse (RQA: *Recurrence Quantification Analysis*). RQA-Analyse ist ein bewährtes Verfahren zur Analyse wiederkehrender Ereignisse in Zeitreihen (Marwan et al. 2007). Die bisherigen RQA-Ansätze und Tools sind auf Zeitreihen mit 10.000 Datenpunkten beschränkt. Um auch größere Zeitreihen mit der RQA-Methode analysieren zu können, wurde das existierende RQA-Verfahren mit Konzepten aus der Informatik modifiziert. Mit Hilfe des »Divide and Recombine (D&R)«-Konzepts wird die RQA-Analyse auf mehreren GPUs (*Graphics Processing Units*) parallel durchge-

führt. Unser D&R-Algorithmus hat die Rechenzeit für die RQA-Analyse von langen Zeitreihen erheblich reduziert. Zum Beispiel konnte mit unserer GPU-Implementierung (mittels *OpenCL Framework*) die Analyse der seit 1893 kontinuierlich erhobenen Potsdamer Klimamessreihe mit einer Million Zeitpunkten von mehr als sechs Stunden auf zweieinhalb Minuten reduziert werden (Rawald et al. 2014). Damit können Wissenschaftler eine RQA-Analyse von Zeitreihen mit einer nahezu beliebigen Anzahl von Datenpunkten schnell durchführen.

4 Zusammenfassender Ausblick

Grundlage für die Präzisionsvermessung und Navigation ist der fundamentale geozentrische globale terrestrische Referenzrahmen mit Millimetergenauigkeit sowie eine ebenso genaue am Erdschwerefeld ausgerichtete Höhenbezugsfäche (Geoid) einschließlich ihrer zeitlichen Änderungen. Die Datenauswertung im Department 1 »Geodäsie und Fernerkundung« dient dazu, geodätische Parameter in Bezug auf Naturgefahren und klimarelevante Massentransporte im System Erde quantitativ zu erfassen, GNSS-Signale für die Positionsbestimmung und Fernerkundung zu nutzen und Veränderungen der festen Erde aber auch der Atmo-, Hydro-, Kryo- und Biosphäre zu ermitteln. Die Ergebnisse der geodätischen Messungen werden Modellen gegenübergestellt, mit denen das System Erde dargestellt werden soll. Darüber hinaus werden wichtige Beiträge zur Überwachung und Vorhersage des irdischen und des Weltraumwetters geleistet und zahlreiche Entwicklungen im Bereich der Fernerkundung voran gebracht. Um die enormen Datenmengen aus Simulationsmodellen und Beobachtungen auswerten und interpretieren zu können, werden zudem neuartige Methoden und Konzepte im Bereich *Data Mining* und *Visual Analytics* eingesetzt.

Der Artikel zeigt Beispiele der an den fünf Sektionen des Departments 1 laufenden Forschungsprojekte. Eingebunden in internationale Verbundvorhaben und Dienste leisten sie einen erheblichen Beitrag zur geodätischen Forschung in Deutschland.

Dank

Die Autoren möchten sich für die äußerst sorgfältige Bearbeitung des Beitrags durch den Schriftleiter der zfv sowie für die sehr konstruktiven Gutachten bedanken.

Literatur

- Baeyer, Johann Jacob: Ueber die Größe und Figur der Erde: Eine Denkschrift zur Begründung einer mittel-europäischen Gradmessung nebst einer Uebersichtskarte. Georg Reimer, Berlin, 1861.
- Bender, M., Dick, G., Ge, M., Deng, Z., Wickert, J., Kahle, H.-G., Raabe, A., Tetzlaff, G.: Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Advances in Space Research*, 47, 10, 1704–1720. doi:10.1016/j.asr.2010.05.034, 2011.
- Buschmann, E.: Einst auf dem Telegrafenberge. *Vermessung Brandenburg*, 2: 5–17, 1996.
- Buschmann, E.: Einst auf dem Telegrafenberge. *Vermessung Brandenburg*, 1: 55–62, 1997.
- Chabrillat, S., Ben-Dor, E., Viscarra Rossel, R.A., Dematté, J.A.M.: Quantitative Soil Spectroscopy. *Applied and Environmental Soil Science*, 13, ID 616578, 2013.
- Ciufolini, I., Pavlis, E.C., Paolozzi, A., Ries, J., König, R., Matzner, R., Sindoni, G., Neumayer, K.-H.: Phenomenology of the Lense-Thirring effect in the Solar System: Measurement of frame-dragging with laser ranged satellites. *New Astronomy*, 17, 3, pp. 341–346. doi:10.1016/j.newast.2011.08.003, 2012.
- Dill, R., Dobslaw, H.: Numerical simulations of global-scale high-resolution hydrological crustal deformations. *Journal of Geophysical Research*, 118, 9, 5008–5017, 2013.
- Dobslaw, H., Flechtner, F., Bergmann-Wolf, I., Dahle, C., Dill, R., Esselborn, S., Sasgen, I., Thomas, M.: Simulating high-frequency atmosphere-ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RL05. *Journal of Geophysical Research*, 118, 7, 3704–3711, 2013.
- Dransch, D., Sips, M., Unger, A., Köthur, P.: Data Mining und visuelle Datenexploration zur Beantwortung geowissenschaftlicher Fragestellungen. *System Erde, GFZ-Journal*, 3, 1, 78–83, doi:10.2312/GFZ.syserde.03.01.11, 2013.
- Falck, C., Ramatschi, M., Subarya, C., Bartsch, M., Merx, A., Hoebechts, J., Schmidt, G.: Near real-time GPS applications for tsunami early warning systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 10, 2, 181–189. doi:10.5194/nhess-10-181-2010, 2010.
- Flechtner, F., Morton, P., Watkins, M., Webb, F.: Status of the GRACE Follow-on Mission, accepted for Proc. of the International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems (GGHS2012), Marti, U. (Ed.), IAG Symp. 141, 2014.
- Förste, Ch.: Vermessung des Erdschwerefelds mit Satelliten – Genauigkeitssteigerung durch Einsatz neuer Techniken. *System Erde, GFZ-Journal*, 3(1), 6–13, <http://systemerde.gfz-potsdam.de>, doi:10.2312/GFZ.syserde.03.01.1, 2013.
- Förster, S., Kaden, K., Förster, M., Itzerott, S.: Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. *Computers and Electronics in Agriculture*, 89, pp. 30–40, 2012.
- Gendt, G., Dick, G., Reigber, Ch., Tomassini, M., Liu, Y., Ramatschi, M.: Near real time GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany. *J. Met. Soc. Japan*, 82(1B), 361–370, 2004.
- Güntner, A., Schmidt, R., Döll, P.: Supporting large-scale hydrogeological monitoring and modelling by time-variable gravity data. *Hydrogeology Journal*, 15, 1, 167–170, doi:10.1007/s10040-006-0089-1, 2007.
- Hagedoorn, J., Greiner-Mai, H., Ballani, L.: Determining the time-variable part of the toroidal geomagnetic field in the core-mantle boundary zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 178, 1–2, pp. 56–67, 2010.
- Han, J., Kamber, M.: Data Mining—Concepts and Techniques. Elsevier, 2006.
- Heiden, U., Heldens, W., Roessner, S., Segl, K., Esch, T., Mueller, A.: Urban structure type characterization using hyperspectral remote sensing and height information. *Landscape and Urban Planning*, 105, 4, pp. 361–375, 2012.
- Hey, T., Tansley, S., Tolle, K. (Eds.): The Fourth Paradigm: Data-intensive scientific discovery. Microsoft Research, 2009.
- Höpfner, J.: Absolute Bestimmung der Schwere mit Reversionspendeln in Potsdam. *Jahresschrift der Deutschen Gesellschaft für Chronometrie*, Band 51, S. 101–114, 2012.
- Kaban, M., Trubitsyn, V.: Density structure of the mantle transition zone and the dynamic geoid. *Journal of Geodynamics*, 59–60, 183–192, 2012.
- Kaufmann, H., Segl, K., Küster, T., Rogäß, C., Förster, S., Wulf, H., Hofer, S., Sang, B., Storch, T., Heiden, U., Mueller, A., Rossner, G., Chlebek, C.: The environmental mapping and analysis program (EnMAP) – Present status of preparatory phase. *Proceedings, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS (Melbourne, Australia 2013)*, 2013.
- Keim, D., Kohlhammer, J., Ellis, G., Mansmann, F. (Eds.): Mastering the information age: solving problems with visual analytics. Eurographics Association, Goslar, ISBN 978-3-905673-77-7, 2010.
- Köthur, P., Sips, M., Unger, A., Kuhlmann, J., Dransch, D.: Interactive visual summaries for detection and assessment of spatiotemporal patterns in geospatial time series. *Information Visualization* 13, 3, p. 283–298. doi:10.1177/1473871613481692, 2013.
- Köthur, P., Sips, M., Dobslaw, H., Dransch, D.: Visual Analytics for Comparison of Ocean Model Output with Reference Data: Detecting and Analyzing Geophysical Processes Using Clustering Ensembles. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)*. 2014, (accepted).
- Li, X., Dick, G., Ge, M., Heise, S., Wickert, J., Bender, M.: Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: precise point positioning with orbit, clock and phase delay corrections. *Geophysical Research Letters*, 2014, in print.
- Lubitz, C., Motagh, M., Wetzel, H.-U., Kaufmann, H.: Remarkable Urban Uplift in Staufen im Breisgau, Germany: Observations from TerraSAR-X InSAR and Leveling from 2008 to 2011. *Remote Sensing*, 5, 6, pp. 3082–3100, 2013.
- Marwan, N., Romano, C.M., Thiel, M., Kurths, J.: Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physical Reports*; 438, Issues 5–6, 237–329, 2007.
- Mielke, C., Boesche, N., Rogass, C., Kaufmann, H., Gauert, C., de Witt, M.: Spaceborne mine waste mineralogy monitoring in South Africa – applications for modern push-broom missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2. *Remote Sensing* 6, ISSN: 2072-4292, 2014.
- Motagh, M., Wetzel, H.-U., Roessner, S., Kaufmann, H.: A TerraSAR-X InSAR study of landslides in southern Kyrgyzstan, Central Asia. *Remote Sensing Letters*, 4, 7, pp. 657–666, 2013.
- Petrunin, A., Rogozhina, I., Vaughan, A.P.M., Kukkonen, I.T., Kaban, M., Koulakov, I., Thomas, M.: Heat flux variations beneath central Greenland's ice due to anomalously thin lithosphere. *Nature Geoscience*, 6, 746–750, 2013.
- Rawald, T., Sips, M., Marwan, N., Dransch, D.: Fast computation of recurrences in long time series. In: Norbert Marwan (Hrsg.), *Proceedings in Mathematics*, Springer Verlag, Berlin u.a., 2014, im Druck.
- Reigber, C., Lühr, H., Schwintzer, P., Wickert, J. (Eds.): *Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit*. Springer, Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-22804-7, 2005.
- Sasgen, I., Kleemann, V., Martinec, Z.: Towards the inversion of GRACE gravity fields for present-day ice-mass changes and glacial-isostatic adjustment in North America and Greenland. *Journal of Geodynamics*, 59–60, pp. 49–63, 2012.
- Sasgen, I., Konrad, H., Ivins, E.R., van den Broeke, M.R., Bamber, J.L., Martinec, Z., Kleemann, V.: Antarctic ice-mass balance 2002 to 2011: regional re-analysis of GRACE satellite gravimetry measurements with improved estimate of glacial-isostatic adjustment. *Cryosphere*, 7, 1499–1512, 2013.

- Saynisch, J., Thomas, M.: Ensemble Kalman-Filtering of Earth rotation observations with a global ocean model. *Journal of Geodynamics*, 62, 24–29, 2012.
- Schmidt, T., Wickert, J., Faber [Haser], A.: Variability of the upper troposphere and lower stratosphere observed with GPS radio occultation bending angles and temperatures. *Advances in Space Research*, 46, 2, 150–161, doi:10.1016/j.asr.2010.01.021 2010.
- Schön, N., Esselborn, S., Schöne, T.: A 15-year reconstruction of sea level anomalies using radar altimetry and GPS-corrected tide gauge data. In: Flechtner, F., Gruber, T., Güntner, A., Mandea, M., Rothacher, M., Schöne, T., Wickert, J. (Eds.), *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*, (Advanced Technologies in Earth Sciences), Springer, 359–365. doi:10.1007/978-3-642-10228-8_30, 2010.
- Schöne, T., Illigner, J., Manurung, P., Subarya, C., Khafid, Zech, C., Galas, R.: GPS-controlled tide gauges in Indonesia – a German contribution to Indonesia's Tsunami Early Warning System. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 11, 3, 731–740. doi:10.5194/nhess-11-731-2011, 2011.
- Schöne, T., Zech, C., Unger-Shayesteh, K., Rudenko, V., Thoss, H., Wetzel, H.-U., Gafurov, A., Illigner, J., Zubovich, A.: A new permanent multi-parameter monitoring network in Central Asian high mountains – from measurements to data bases. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2, 1, 97–111. doi:10.5194/gi-2-97-2013, 2013.
- Schwerpunkt: Klima im System Erde, System Erde. GFZ-Journal, 2, Heft 1, <http://systemerde.gfz-potsdam.de>, ISSN 2191-8589, 2012.
- Segl, K., Guanter, L., Rogaß, C., Küster, T., Roessner, S., Kaufmann, H., Sang, B., Mogulsky, V., Hofer, S.: EeteS – The EnMAP End-to-End Simulation Tool. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5, 2, pp. 522–530, 2012.
- Shako, R., Förste, C., Abrykosov, O., Bruinsma, S., Marty, J.-C., Lemoine, J.-M., Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C.: EIGEN-6C: A High-Resolution Global Gravity Combination Model Including GOCE Data. In: Flechtner, F., Sneeuw, N., Schuh, W.-D. (Eds.): Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GRACE, GOCE and future missions, (GEOTECHNOLOGIEN Science Report; No. 20; Advanced Technologies in Earth Sciences), Berlin [u.a.]: Springer, 155–161. doi:10.1007/978-3-642-32135-1_20, 2014.
- Sheard, B.S., Heinzel, G., Danzmann, K., Shaddock, D.A., Klipstein, W.M., Folkner, W.M.: Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission, *Journal of Geodesy*, Volume 86, Issue 12, 1083–1095, doi:10.1007/s00190-012-0566-3, 2012.
- Stolk, W., Kaban, M., Beekman, F., Tesauro, M., Mooney, W.D., Cloetingh, S.: High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas. *Tectonophysics*, 602, pp. 55–68, 2013.
- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C.: The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920, 2004.
- Tesauro, M., Kaban, M., Cloetingh, S.A.P. L.: Global model for the lithospheric strength and effective elastic thickness. *Tectonophysics*, 602, 78–86, 2013.
- Thomas, J.J., Cook, K.A. (Eds.): Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics. National Visualization and Analytics Center (NVAC), 2005.
- Thomas, M., Sündermann, J., Maier-Reimer, E.: Consideration of ocean tides in an OGCM and implications for polar motion. *Geophysical Research Letters*, 28, 12, pp. 2457–2460, 2001.
- Torge, W.: Geschichte der Geodäsie in Deutschland. de Gruyter, Berlin, ISBN-10: 3110207192, 2009.
- Unger, A., Schulte, S., Klemann, V., Dransch, D.: A Visual Analytics Concept for the Validation of Geoscientific Simulation Models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18, 12, 2216–2225, 2012.
- Werth, S., Güntner, A.: Calibration analysis for water storage variability of the global hydrological model WGHM. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1, 59–78, doi:10.5194/hess-14-59-2010, 2010.
- Wickert, J., Reigber, C., Beyerle, G., König, R., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T., Melbourne, W.G., Hocke, K.: Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First Results from CHAMP. *Geophysical Research Letters*, 28, 17, 3263–3266, 2001.
- Wickert, J., Michalak, G., Schmidt, T., Beyerle, G., Cheng, C.Z., Healy, S.B., Heise, S., Huang, C.Y., Jakowski, N., Köhler, W., Mayer, C., Offiler, D., Ozawa, E., Pavelyev, A.G., Rothacher, M., Tapley, B., Arras, C.: GPS radio occultation: results from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20, 1, 35–50, 2009.
- Wickert, J.: Near-real-time provision and usage of global atmospheric data from CHAMP and GRACE (NRT-RO): Motivation and Introduction. In: Flechtner, F., Gruber, T., Güntner, A., Mandea, M., Rothacher, M., Schöne, T., Wickert J. (Eds.), *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*, Springer, 429–432, 2010.
- Wickert, J., Beyerle, G., Cardellach, E., Förste, C., Gruber, T., Helm, A., Hess, M.P., Høeg, P., Jakowski, N., Montenbruck, O., Rius, A., Rothacher, M., Shum, C.K.: GNSS REflectometry, Radio Occultation and Scatterometry onboard ISS for long-term monitoring of climate observations using innovative space geodetic techniques on-board the International Space Station. *Proposal in response to ESA Research Announcement for ISS Experiments relevant to study of Global Climate Change*, 2011.

Anschrift der Autoren/Autorinnen

Prof. Dr. Harald Schuh | Dr. Sibylle Itzerott | Prof. Dr. Doris Dransch | Prof. Dr. Frank Flechtner | Dr. Christoph Förste | Prof. Dr. Hermann Kaufmann | Prof. Dr. Maik Thomas | Dr. Jens Wickert

Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Stiftung des Öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg
Telegrafenberg, 14473 Potsdam

harald.schuh@gfz-potsdam.de | sibylle.itzerott@gfz-potsdam.de | doris.dransch@gfz-potsdam.de | frank.flechtner@gfz-potsdam.de | christoph.foerste@gfz-potsdam.de | hermann.kaufmann@gfz-potsdam.de | maik.thomas@gfz-potsdam.de | jens.wickert@gfz-potsdam.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaeis.info.