

Globaler Wandel, GGOS und GEOSS

Markus Rothacher

Zusammenfassung

Auf internationaler Ebene arbeitet die Group on Earth Observation (GEO) daran, ein Global Earth Observing System of Systems (GEOSS) aufzubauen, um den globalen Wandel in all seinen Facetten zu erfassen. Das Global Geodetic Observing System (GGOS) ist Teil von GEOSS und leistet mit den geodätischen Weltraumbeobachtungstechniken und dedizierten Satellitenmissionen wesentliche Beiträge zu diesem umfassenden System. Neben einem hochgenauen, stabilen Referenzrahmen stellt GGOS auch lange, homogene Zeitreihen mit essentiellen Informationen über die Gestalt und Deformation der Erde, die Atmosphäre, die sich ändernde Rotation der Erde und das Schwerfeld der Erde samt seinen zeitlichen Änderungen zur Verfügung. In diesen Größen manifestieren sich viele globale Prozesse wie Erdbeben, Vulkanismus, Überschwemmungen, Meeresspiegeländerungen, Grundwasseränderungen, globale Erwärmung und Abschmelzen der polaren Eiskappen.

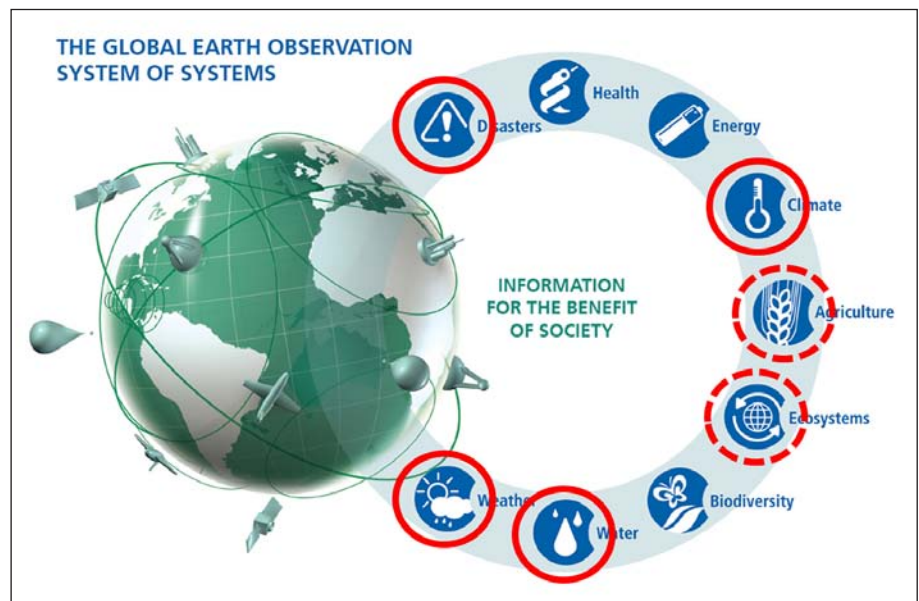
Summary

The Group on Earth Observation (GEO) is working at an international level on the establishment of a Global Earth Observing System of Systems (GEOSS), in order to monitor global change in all its aspects. The Global Geodetic Observing System (GGOS) is part of GEOSS and contributes, with the geodetic space techniques and dedicated satellite missions, substantially to this integrated system of systems. Besides a high-precision and stable reference frame GGOS is also generating long-term homogenous time series containing essential information about the shape and deformation of the Earth, the atmosphere, the changing rotation of the Earth and the Earth gravity field and its temporal variations. These quantities again give evidence of a variety of global processes like earthquakes, volcanism, floods, sea level change, ground water variations, global warming and the melting of the Arctic and Antarctic ice caps.

Schlüsselwörter: Globaler Wandel, GGOS, GEO, GEOSS

1 GEO, GEOSS und GGOS

Die »Group on Earth Observation« (GEO) wurde im Jahre 2002 als Folge der Beschlüsse des Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung (Johannesburg, Südafrika) gegründet. GEO hat sich das Ziel gesetzt, den Aufbau eines »Global Earth Observing System of Systems« (GEOSS) als Grundlage für gesellschaftliche und politische Entscheidung zu koordinieren und sämtliche Bereiche der globalen



Quelle: GEO (2012)

Abb. 1: Die neun »Societal Benefit Areas« (SBA) des Global Earth Observing System of Systems (GEOSS) und die Beiträge von GGOS

Erdbeobachtung, von der festen Erde über die Ozeane bis hin zur Biodiversität zu einem einzigen komplexen System zu verknüpfen. Jose Achache, der vormalige Direktor des GEO Sekretariats, beschreibt es so:

»Observing the Earth and understanding its interlinked systems is too large a task for any one government or organization. The Global Earth Observing System of Systems provides the framework to connect all observing systems and produces and delivers the required information. GEOSS underpins the efforts of decision makers to engineer solutions to our changing planet.«

GEO will sich mit GEOSS in neun sogenannten »Societal Benefit Areas« (SBA) einbringen, nämlich in den Bereichen Katastrophen, Gesundheit, Energie, Klima, Wasser, Wetter, Ökosysteme, Agrikultur und Biodiversität (s. GEO (2012) und Abb. 1).

Geschichtlich gesehen wurde das Global Geodetic Observing System (GGOS) im Jahr 2003 durch die International Association of Geodesy (IAG) etabliert. Bereits im April 2004 wurde die IAG, und damit GGOS, ein Mitglied von GEO und damit Teil des GEOSS. Im Juli 2007

wurde der Status von GGOS von einem Projekt zu einer offiziellen Komponente der IAG geändert und im November 2011 erhielt GGOS die Mitgliedschaft des »Committee on Earth Observation Satellites« (CEOS).

Die 2011 neu formulierte Vision von GGOS lautet »Advancing our understanding of the dynamic Earth system by quantifying our planet's changes in space and time« und beschreibt das generelle Ziel von GGOS sehr gut (siehe auch GGOS (2012) für mehr Details). Es zeigt auch die Relevanz von GGOS für den globalen Wandel auf. Eine wesentlich weitergehende Beschreibung von GGOS und was es bis 2020 leisten soll, findet man in Plag und Pearlman (2009). Dieses sogenannte »GGOS2020-Buch« bildet die Basis für die Entwicklung von GGOS bis ins Jahr 2020. Ein Zwischenstand von GGOS ist in Beutler und Rummel (2009) und Rothacher (2011) wiedergegeben.

GGOS kann als die geodätische Komponente von GEOSS betrachtet werden, d.h. die metrologische Basis für alle Arten von Erdbeobachtung, und stellt insbesondere einen hochgenauen und stabilen Referenzrahmen bereit. Verglichen mit den anderen globalen Erdbeobachtungssystemen wie GCOS (Climate), GTOS (Terrestrial) und GOOS (Ocean), ist GGOS ein sehr transdisziplinäres System, das fundamentale Beiträge zu sehr unterschiedlichen Komponenten des Erdsystems bereitstellt. Abb. 1 zeigt insbesondere, zu welchen der neun SBA von GEO GGOS beitragen kann (roter Kreis: GGOS kann Essentielles beitragen; gestrichelter roter Kreis: GGOS kann beitragen). Diese Beiträge zu den SBA von GEO und zum globalen Wandel wollen wir im Folgenden etwas genauer darstellen.

2 Globaler Wandel: Beiträge des GGOS

Um die genauen Dimensionen des globalen Wandels im System Erde zu verstehen – und wir wollen hier den globalen Wandel in einem allgemeineren Sinn verstehen als nur auf Klimaveränderungen beschränkt –, müssen wir als Basis für präzise Voraussagen einerseits genaue und zuverlässige numerische und analytische Modelle entwickeln und andererseits ein kontinuierliches Monitoring von sehr großen und sehr kleinen Veränderungen im System Erde realisieren, von extrem kurzen Ereignissen (Erdbeben, Vulkanausbrüche, Hangrutschungen, ...) bis zu Prozessen, die während Jahrzehnten oder gar geologischen Zeitaltern ablaufen (Meeresspiegeländerungen, postglaziale Landhebung, Plattentektonik, ...). Um dieser zweiten, stark die Geodäsie betreffenden Herausforderung gewachsen zu sein, benötigen wir ein sehr dichtes globales Erdbeobachtungssystem, das eine Vielfalt von Beobachtungstechniken sowohl am Boden als auch im Weltraum vereinigt und integriert. Dieses Ziel der Integration, bezogen auf die geodätischen Beobachtungsmethoden, wird von GGOS verfolgt, (Plag et al. 2009, Plag et al. 2010). Die langen Zeitreihen von geodätischen,

geophysikalischen und geodynamischen Parametern des globalen geodätischen Beobachtungssystems GGOS beinhalten essentielle Informationen über die Gestalt und Deformation der Erde, der Wasser- und Eisoberflächen, über die Atmosphäre, die sich ändernde Rotation der Erde, das statische und das sich zeitlich ändernde Schwerefeld der Erde. In diesen Größen wiederum zeigen sich viele globale Prozesse, die einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Menschheit haben wie Erdbeben, Vulkanismus, Überschwemmungen, Meeresspiegeländerungen, Grundwasseränderungen und das Abschmelzen der polaren Eiskappen. Viele dieser Prozesse sind Teilaspekte des globalen Wandels im weitesten Sinn.

2.1 Feste Erde

Die geodätischen Weltraumtechniken, nämlich Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), DORIS (ein französisches Doppler-System) und insbesondere die Global Navigation Satellite Systems (GNSS) mit GPS und GLONASS, und in Zukunft mit dem

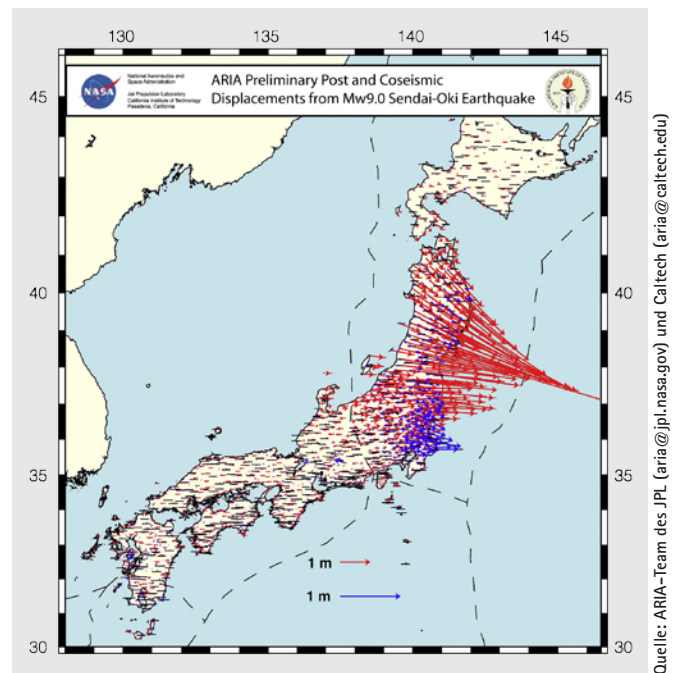


Abb. 2: Horizontale Verschiebungen durch das Sendai-Oki-Erdbeben der Magnitude Mw9.0 (Hauptbeben in rot, Nachbeben in blau) für die Stationen des GPS-Permanetnetzes GEONET in Japan

europäischen Galileo und dem chinesischen Compass, erlauben es heutzutage, die Gestalt und die Deformation der Erde mit tausenden von Permanentstationen mit einer nie dagewesenen Genauigkeit und Zeitaufösung zu erfassen. Als wichtige Voraussetzung für das Monitoring des globalen Wandels liefern diese geodätischen Weltraumtechniken insbesondere einen äußerst genauen und zeitlich stabilen Referenzrahmen. Gerade im Hinblick auf die Messung des Meeresspiegelanstiegs von etwa 3 mm/Jahr

steht man vor der Herausforderung, einen Referenzrahmen mit einer Genauigkeit der Positionen von ca. 1 mm und der zeitlichen Änderungen von ca. 0,1 mm/Jahr zu realisieren, ein Ziel, von dem man heute noch um rund einen Faktor 10 entfernt ist. Die genaue Realisierung des Referenzrahmens stellt daher auch eine der größten Fehlerquellen bei der Bestimmung des Meeresspiegelanstiegs dar (Blewitt et al. 2010).

Durch genaue GPS-Zeitreihen lassen sich auch Phänomene wie die Plattentektonik und die postglaziale Landhebung erfassen sowie die Verschiebungen aufgrund von Erdbeben oder transienten Prozessen. Abb. 2 gibt ein Beispiel für das große Erdbeben von Sendai-Okai im März 2011 in Japan. Die GPS-Verschiebungen des dichten GPS-Netzes lassen sich sehr erfolgreich für die Bestimmung der Erdbebencharakteristiken heranziehen (Blewitt et al. 2006). Heute werden mit GPS-Empfängern sogar die Erdbebenwellen selbst (mit Messraten von bis zu 100 Hz) gemessen (Larson et al. 2004, Genrich und Bock 2006).

In kleinräumigen Gebieten werden heute vermehrt sehr günstige GPS-Empfänger mit nur einer Frequenz eingesetzt. Damit lässt sich für den Preis von wenigen

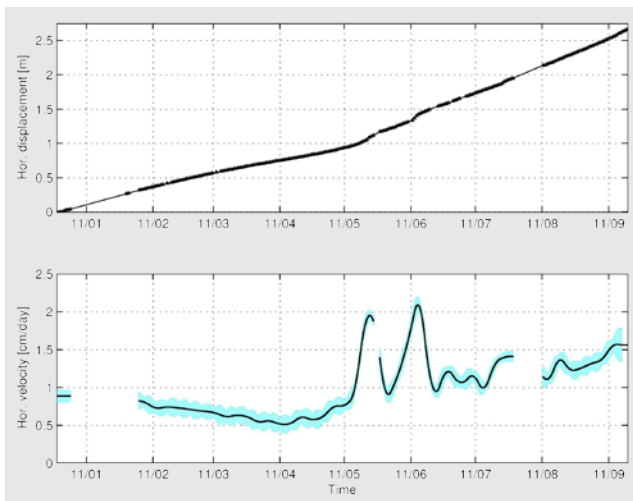


Abb. 3: Verschiebung (oben) und Geschwindigkeit (unten) des Dirru-Blockgletschers im Wallis in der Schweiz während acht Monaten. Nach Niederschlägen (Mai und Juni 2011) nimmt die Geschwindigkeit massiv zu.

geodätisch nutzbaren GPS-Empfängern eine wesentlich größere Anzahl von preislich günstigeren Modellen beschaffen, was dann eine dichtere Abdeckung des Gebietes erlaubt, das von Interesse ist. So werden z.B. in der Schweiz Blockgletscher – Gesteinsmassen, die durch Permafrost zusammengehalten werden und die sich nun durch die steigende Erwärmung zu bewegen beginnen und zerbrechen können – mit dieser Methode überwacht. Abb. 3 zeigt die Geschwindigkeiten (0,5–2,1 cm/Tag) des Dirru-Blockgletschers, die sich je nach Niederschlag um bis zu einen Faktor vier verändern können.

2.2 Massenverteilung und -transport

Die Schwerefeldsatellitenmissionen »Gravity Recovery and Climate Experiment« (GRACE) und »Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer« (GOCE) haben in den letzten Jahren neue Maßstäbe in der Bestimmung des Schwerefeldes der Erde gesetzt. So können mit den GRACE-Daten das Ausmaß (und die Zunahme) des

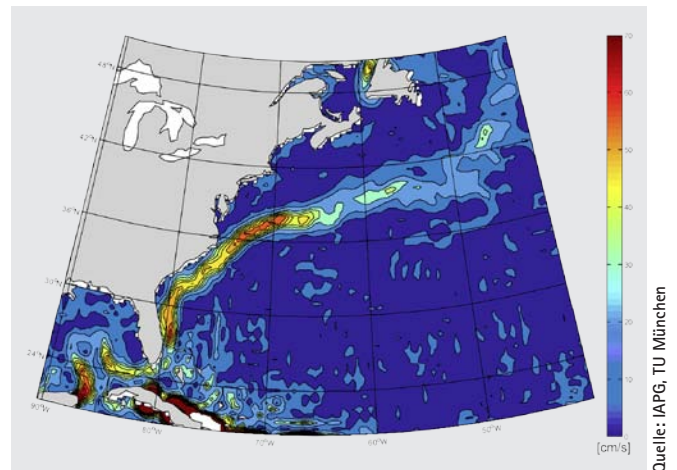


Abb. 4: Geostrophische Strömungsgeschwindigkeiten: Differenz zwischen dem Geoid aus GOCE-Messungen und der mittleren Meerestopographie aus Satellitenaltimetrie-Daten

Abschmelzens der Eiskappen in Grönland (Velicogna und Wahr 2006) und in der Antarktis (Zwally et al. 2011), die sich saisonal ändernden Wassermassen in den Kontinenten (Chen et al. 2010) und Massenänderungen in den Ozeanen, d.h. sämtliche größeren Massenverlagerungen (Kusche et al. 2010, Rietbroek et al. 2012), bestimmt werden. Diese GRACE-Resultate sind für den globalen Wandel von entscheidender Bedeutung.

Die GOCE-Mission hat gezeigt, dass sie das statische Schwerefeld mit einer Auflösung von ca. 100 km und einer Genauigkeit der mittleren Geoidhöhen von etwa 1 cm erfassen kann. Durch den Vergleich der räumlich hochaufgelösten Schwerefelder von GOCE mit Altimetrie-Messungen der Meereshöhe erhält man die für die Ozeanographen relevanten geostrophischen Strömungsgeschwindigkeiten. In Abb. 4 ist als Beispiel der Golfstrom mit einer Fülle von Details wiedergegeben.

2.3 Ozeane

Im Abschnitt 2.1 haben wir bereits erläutert, dass die geodätischen Weltraumtechniken den genauen und stabilen Referenzrahmen liefern, die postglaziale Landhebung erfassen können und die Anbindung von Meeresspiegeln an ein globales Referenzsystem ermöglichen. Darüber hinaus gibt die GOCE-Mission wichtige Informationen zu den Strömungen in den Ozeanen (s. Abschnitt 2.2). Hier sei nur noch erwähnt, dass GRACE zusammen mit

Satellitenaltimetrie-Messungen auch den Unterschied zwischen einem Anstieg des Volumens der Ozeane (thermische Ausdehnung) und einem Anstieg der Masse der Ozeane (Abschmelzen der Eiskappen; Horwath und Dietrich 2006) feststellen kann (Kusche et al. 2013, in diesem zfv-Heft). Auch hier zeigt sich, dass eine Kombination von komplementären Sensoren äußerst wichtig ist, um diverse Signale aufzutrennen.

Mit GPS-Bojen trägt die Geodäsie heute zudem zur Detektion von Tsunamis bei. Längerfristig möchte man sogar die an der Meeresoberfläche reflektierten GPS-, GLONASS-, Galileo- und Compass-Signale mit tieffliegenden Satelliten erfassen und dazu benutzen, die Meereshöhe zu messen und ein globales Frühwarnsystem für Tsunamis aufzubauen.

2.4 Atmosphäre

Da sich sämtliche von einem Satelliten zur Erde gesendeten Signale durch die Atmosphäre bewegen müssen, kann aufgrund der Verzögerungen oder der Beugung durch die Atmosphäre auf die Eigenschaften der Atmosphäre geschlossen werden. Bereits heute werden die mit Hilfe von permanenten GPS-Bodenstationen in nahezu Echtzeit bestimmten Wasserdampfwerte für die Wettervorhersagen verwendet. Da die Zeitreihen solcher Wasserdampfwerte auch immer länger werden, werden bald auch Aussagen zu Klimaänderungen möglich werden. Ähnliches gilt für die Radiookkultationsmessungen (Foelsche et al. 2009), bei denen mit Hilfe eines GPS-Empfängers an Bord eines tieffliegenden Satelliten Profile der Atmosphäre aufgenommen werden können. Auch diese Informationen fließen bereits in Wettervorhersagen ein. Zudem erkennt man erste klimatologisch gesehen interessante Trends, darunter eine leichte Erhöhung der Tropopause von ca. 66 m pro Jahrzehnt (Schmidt et al. 2006).

3 GGOS und die Zukunft

Während in der Periode von 1970 bis 1990 eine rasant Entwicklung der globalen geodätischen Infrastruktur stattfand, die unter anderem durch das NASA Crustal Dynamics Project initiiert wurde, wurden in den darauffolgenden Jahren nur noch individuelle Fundamentalstationen durch einzelne Institutionen und nur für spezifische Techniken weiterentwickelt. Der Betrieb einiger Stationen wurde während dieser Zeit sogar eingestellt. Mit dem Argument des GGOS und aufgrund der Initiativen einzelner IAG-Dienste (z.B. VLBI2010: Petrachenko et al. 2009) hat nun eine neue Ära des Aufbaus innovativer Infrastruktur begonnen. Es wird erwartet, dass in den nächsten paar Jahren allein für VLBI mehr als 20 neue Teleskope operationell werden. Ein schönes Beispiel sind

die VLBI-Zwillingsteleskope im geodätischen Observatorium Wettzell, Bayerischer Wald (Abb. 5).

Dies zeigt, dass das GGOS-Ziel, bis ins Jahr 2020 etwa 40 globale, mit neuester Technologie ausgestattete GGOS-Fundamentalstationen zu bauen (Plag und Pearlman 2009), mit einer gemeinsamen Anstrengung von GGOS, den IAG-Diensten und den verantwortlichen nationalen Institutionen durchaus realistisch erscheint.



Quelle: BKG, Geodätisches Observatorium Wettzell

Abb. 5: Die neuen VLBI-Zwillingsteleskope in Wettzell

Was GPS betrifft, sind bereits jetzt tausende von Permanentstationen installiert. Die Anzahl wird in den nächsten Jahren auf 10.000 bis 20.000 anwachsen. Zudem werden die Stationen in den nächsten Jahren so aufgerüstet werden, dass sie sämtliche GNSS (d.h. GPS, GLONASS, Galileo und Compass; siehe auch Steigenberger et al. 2013, in diesem zfv-Heft), also ungefähr 120 Satelliten aufzeichnen werden, und die Verarbeitung der Daten wird in nahezu Echtzeit oder Echtzeit erfolgen. Dies lässt die Vision eines instantanen, globalen Monitorings unseres »pulsierenden« Planeten in greifbare Nähe rücken (siehe z.B. Sendai-Erdbeben 2011). Im Weltall werden vermehrt ganze Konstellationen von Erdbeobachtungssatelliten und Formationsflüge mehrerer Satelliten in den Fokus rücken. Damit wird in Zukunft ein noch wesentlich leistungsfähigeres globales geodätisches Beobachtungssystem geschaffen werden, das eine essentielle Datenbasis für die Einschätzung und Voraussage des »Globalen Wandels« zur Verfügung stellen wird.

4 Schlussfolgerungen

Das Erfassen und Quantifizieren der großen Veränderungen im System Erde stellt die Geodäsie heute vor große Herausforderungen, da einerseits sehr kleine, unscheinbare Trends (Meeresspiegelanstieg, GIA, Abschmelzen der Polkappen, Erwärmung der Atmosphäre etc.) präzise gemessen und über viele Jahrzehnte zuverlässig prädiiziert und andererseits sehr schnell ablaufende Ereignisse (Erdbeben, Tsunami, Hangrutschungen, Überflutungen etc.) in nahezu Echtzeit detektiert und analysiert werden

müssen. Wir haben gesehen, dass die Geodäsie in sehr vielfältiger Weise zu beiden Bereichen beitragen kann. Die Beiträge reichen vom Bereitstellen und Erhalten eines hochgenauen, stabilen Referenzrahmens als Voraussetzung für jegliche Erdbeobachtung bis zum beeindruckenden Erfassen von großen Massenbewegungen mit den neuen Satellitenmissionen. Die Experten der betroffenen Disziplinen (Ozeanologen, Glaziologen, Meteorologen, Hydrologen und Geophysiker) von der Art und Bedeutung dieser Beiträge zu überzeugen, setzt allerdings einen hohen Grad an interdisziplinärer Vernetzung voraus, was für sich allein gesehen bereits eine Herausforderung darstellt. Die globale geodätische Gemeinschaft arbeitet daher intensiv daran, im Rahmen von GGOS diese Aktivitäten zu fördern und die Vernetzung zu koordinieren. Die bereits stark verbesserte internationale Sichtbarkeit von GGOS (z.B. durch die Mitgliedschaften in GEO und CEOS) und die nach vielen Jahren Stillstand neu erfolgte Finanzierung wichtiger Beobachtungsinfrastruktur (VLBI- und SLR-Stationen, Satellitenmissionen; Rothacher 2011) in vielen Ländern sind erste bedeutende Erfolge dieser Strategie.

Dank

Für die von den Mitarbeiter/innen des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ), Potsdam, und des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, zur Verfügung gestellten Resultate möchte ich mich herzlich bedanken.

Literatur

- Beutler G., Rummel R.: Scientific Rationale and Development of the Global Geodetic Observing System, In: *Geodesy for Planet Earth*, Proceedings of the 2009 IAG Symposium, Buenos Aires, Argentina, August 31–4 September 2009, Eds.: Kenyon S., Pacino M. C., Marti U., ISBN 978-3-642-20337-4, 2011.
- Blewitt G., Kreemer C., Hammond W. C., Plag H.-P., Stein S., Okal E.: Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems, *Geophysical Research Letters*, 33, L11309, doi:10.1029/2006GL026145, 2006.
- Blewitt G., Altamimi Z., Davis J., Gross R., Kuo Ch.-J., Lemoine F. G., Moore A. W., Neilan R. E., Plag H.-P., Rothacher M., Shum C. K., Sideris M. G., Schöne T., Tregoning P., Zerbini S.: Geodetic Observations and Global Reference Frame Contributions to Understanding Sea-Level Rise and Variability, in »Understanding Sea-Level Rise and Variability«, Eds.: Church J. A., Woodworth Ph. L., Aarup Th., Wilson W. S., Wiley-Blackwell, ISBN 978-1-4443-3452-4, 256–284, 2010.
- Chen J. L., Wilson C. R., Tapley B. D.: The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resources Research*, 46:12526, doi: 10.1029/2010WR009383, 2010.
- Foelsche U., Pirscher B., Borsche M., Kirchengast G., Wickert J.: Assessing the climate monitoring utility of radio occultation data: From CHAMP to FORMOSAT-3/COSMIC, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, doi 10.3319/TAO.2008.01.14.01(F3C), 20, 1, 155–170, 2009.

- Genrich J. F., Bock Y.: Instantaneous geodetic positioning with 10–50 Hz GPS measurements: noise characteristics and implications for monitoring networks, *Journal of Geophysical Research*, 111, B03403, doi: 10.1029/2005JB003617, 2006.
- GEO (2012): www.earthobservations.org/about_geo.shtml, letzter Zugriff 09/2012.
- GGOS (2012): www.ggos.org, letzter Zugriff 09/2012.
- Horwath M., Dietrich R.: Errors of regional mass variations inferred from GRACE monthly solutions, *Geophys Res Lett*, Vol. 33, L07502, doi:10.1029/2005GL025550, 2006.
- Kusche J., Bosch W., Becker M.: Vermessung des globalen Wandels aus dem Weltraum: Meeresspiegel und Klima, *zfv* 138 (1) [dieses Heft] S. 21–30, 2013.
- Kusche J., Eicker A., Bosch W., Flechtner F.: Das DFG-Schwerpunktprogramm SPP1257 »Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde«, *zfv* 135 (4), S. 247–255, 2010.
- Larson K. M., Bodin P., Gombert J.: Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake, *Science*, 300 (5624), 1421–1424, doi:10.1126/science.1084531, 2003.
- Petrachenko et al.: Design Aspects of the VLBI2010 System. Progress Report of the VLBI2010 Committee. NASA Technical Memorandum NASA/TM-2009-214180, 2009.
- Plag H.-P., Pearlman M. (Eds.): *Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*, Springer Verlag, DOI 10.1007/978-3-642-02687-4_3, 2009.
- Plag H.-P., Gross R., Rothacher M.: Global Geodetic Observing System for Geohazards and Global Change, in: *Geosciences*, BRGM's journal for a sustainable Earth, 9, 96–103, 2009.
- Plag H.-P., Rizos C., Rothacher M., Neilan R.: The Global Geodetic Observing System (GGOS): Detecting the Fingerprints of Global Change in Geodetic Quantities, in: *Advances in Earth Observation of Global Change*, 125–143, DOI: 10.1007/978-90-481-9085-0_10, 2010.
- Rietbroek R., Fritsche M., Brunabend S. E., Daras I., Kusche J., Schroeter J., Flechtner F., Dietrich R.: Global surface mass from a new combination of GRACE, modeled OBP and reprocessed GPS. *Journal of Geodynamics*, doi 10.1016/j.jog.2011.02.003, 59–60, 64–71, 2012.
- Rothacher, M.: Global Geodetic Observing System (GGOS), in: *IAG Traavaux 2007–2011*, IUGG, 2011.
- Schmidt T., Beyerle G., Heise S., Wickert J., Rothacher M.: A climatology of multiple tropopauses derived from GPS radio occultations with CHAMP and SAC-C. *Geophys Res Lett* 33:L04808. doi: 10.1029/2005GL024600, 2006.
- Sendai-Erdbeben (2011): www.youtube.com/watch?v=6Q-RzgdR0VM, letzter Zugriff 09/2012.
- Steigenberger P., Hauschild A., Montenbruck O., Hugentobler U.: Galileo, Compass und QZSS: aktueller Stand der neuen Satellitennavigationssysteme, *zfv* 138 (1) [dieses Heft], S. 53–59, 2013.
- Velicogna I., Wahr J.: Acceleration of Greenland Ice Mass Loss in Spring 2004. *Nature*, 443:329–331, doi:10.1038/nature.05168, 2006.
- Zwally H. J., Giovinetto M. B.: Overview and Assessment of Antarctic Ice-Sheet Mass Balance Estimates: 1992–2009. *Surveys in Geophysics*, 32:351–376, doi: 10.1007/s10712-011-9123-5, 2011.

Anschrift des Autors

Prof. Dr. Markus Rothacher
 ETH Zürich
 Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
 Schafmattstrasse 34, 8093 Zürich, Schweiz
markus.rothacher@ethz.ch