

# Erdmessung 2030

Jürgen Müller (Sprecher), Roland Pail (Ko-Sprecher) und  
die DGK-Abteilung Erdmessung

## Zusammenfassung

Die Erdmessung trägt maßgeblich dazu bei, die Veränderungen unseres Planeten auf allen relevanten Skalen in Raum und Zeit messtechnisch zu quantifizieren und mit geeigneten Analysetechniken für den Nutzer aufzubereiten. Das vorliegende Papier dokumentiert den aktuellen Stand und nennt die wichtigsten Zukunftsaufgaben, die die Erdmessung in Deutschland mit einem zeitlichen Horizont bis 2030 identifiziert hat. Wesentliche Aufgabe ist dabei die Verwirklichung eines innovativen, integrierten und interdisziplinären Ansatzes.

## Summary

*Physical Geodesy plays a central role in monitoring changes of our planet on all relevant spatial and temporal scales using dedicated measurement systems. It applies sophisticated analysis techniques to provide various products to the user community. This paper reports the current status of its successful activities and identifies future tasks of Physical Geodesy towards 2030. In this context, a key task will be the realization of an innovative, integral and interdisciplinary approach.*

**Schlüsselwörter:** Erdmessung, künftige Entwicklungen Beobachtungssysteme, Modellbildung, Anwendungen

## 1 Erdmessung – Executive Summary

Als Erdmessung bezeichnet man die fortlaufende Ausmessung der zeitlich veränderlichen Geometrie von Land- und Meeresoberfläche, des Schwerefeldes der Erde, ihrer Rotation und Orientierung im Weltraum. Da sich Messsignale durch die Neutralatmosphäre und Ionosphäre ausbreiten, ist diese ebenfalls in die weitere Definition mit eingeschlossen. Die Erdmessung stellt mittels ihrer Observatorien und Referenzstationen den hochgenauen globalen Bezugsrahmen zur Verfügung, den Positionierungssysteme wie etwa GPS und Galileo benötigen.

Ein Schwerpunkt der Erdmessung liegt auf dem Monitoring von physikalisch induzierten Prozesskomponenten und deren Wechselwirkungen im System Erde in genauerer Echtzeit. Sie liefert insbesondere Beobachtungen wie Änderungen von Masse, Volumen, Drehimpuls, die in anderen Disziplinen nicht erfasst werden können. Damit trägt die Erdmessung substanziell zur Lösung zahlreicher »Grand Challenges« unserer Gesellschaft bei, wie die Erfassung von Ursachen und Wirkung des Klimawandels, Risiken von Naturgefahren und Maßnahmen gegen den Verlust von Biodiversität, Lebensraum und Ökosystem-

funktionen. Ein operationelles globales geodätisches Beobachtungssystem, das es erlaubt, an jedem Ort der Erde zu jeder Zeit und mit wenigen Kilometern Auflösung relevante Größen zur Adressierung dieser »Grand Challenges« zu messen, soll bis 2030 realisiert werden. Dabei sollten deutsche Wissenschaftler aufgrund ihrer Expertise weiterhin eine internationale Führungsrolle einnehmen. Dazu ist auch die Unterstützung durch große Forschungseinrichtungen notwendig.

In diesem Dokument werden Herausforderungen in den Bereichen (1) Technologische Entwicklung (Beobachtungssysteme), (2) Methodik, Analyse und Modellbildung und (3) Datenprodukte und Anwendungen identifiziert, um die ambitionierten Ziele zu erreichen und die deutsche Forschung in diesem Kontext international führernd zu positionieren.

Basierend auf umfangreicher Expertise in der konzeptuellen und technologischen Weiterentwicklung der geodätischen Weltraumverfahren, dem Betrieb geodätischer Observatorien sowie der aktiven Beteiligung bei Satellitenmissionen umfassen die aktuellen und zukünftigen Arbeitsfelder im Bereich der *Beobachtungssysteme*:

- Ausbau und Weiterentwicklung geodätischer Observatorien und Beobachtungssysteme zur Erfassung geometrischer und gravimetrischer Messgrößen, unter verstärkter Einbeziehung von flächenhaften Verfahren, wie z.B. SAR/InSAR, und neuen Messkonzepten, wie z.B. GNSS-Reflektometrie;
- Integration und Verknüpfung von Beobachtungsverfahren zur Bereitstellung eines globalen geodätischen Referenzrahmens im Sinne der UN-Resolution »Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development« (UN 2015, 2016);
- Entwicklung und Anwendung neuer Sensoren, insbesondere Bereitstellung und Übertragung von hochgenauer Zeit- und Frequenzinformation.

Im Bereich von *Methodik, Analyse und Modellbildung* zeichnen sich folgende zukünftige Forschungsfelder ab:

- Konsistente, vollständige Modellbildung zur korrekten Parametrisierung und Modellierung von räumlich und zeitlich variablen Signalen auf allen Skalen;
- Weiterentwicklung von stochastischen Modellen zur Beschreibung von Unsicherheiten;
- Konsistente Kombination und Analyse von geometrischen und gravimetrischen Messgrößen und deren Integration in Erdsystemmodelle;
- Numerisch effiziente Umsetzung auf massiv-parallelen Hochleistungsrechnern.

Im Bereich der *Datenprodukte und Anwendungen* stellen sich folgende Herausforderungen:

- Erstellung integrierter und disziplinübergreifender Produkte;
- Bereitstellung integrierter Referenzrahmen in Lage und Höhe durch die internationalen Dienste der International Association of Geodesy (IAG);
- Bereitstellung von Produkten in genauerer Echtzeit im Rahmen von operationellen Services als zentrales Element einer europäischen Forschungsinfrastruktur.

## 2 Herausforderungen

Unter »Grand Challenges« versteht man fundamentale Herausforderungen für unsere Gesellschaft, deren Lösung einen deutlich spürbaren Fortschritt in gesellschaftlicher, sozialer oder ökonomischer Hinsicht bewirken würde. Zu den großen gesellschaftlichen Herausforderungen in den Geowissenschaften gehören Naturgefahren und Katastrophenvorsorge, Klimawandel und Klimaschutz, Trinkwasser und Wasserverfügbarkeit, Nachhaltigkeitssicherung natürlicher Ressourcen sowie Nutzung und Gestaltung des Lebensraums Erde. Diese sind beispielsweise in den UN-Nachhaltigkeitszielen 13 (Klimawandel), 14 (Ozeane) und 15 (Landökosysteme) verankert.

Die Erdmessung trägt zur Lösung dieser »Grand Challenges«, wie z. B. Ursachen und Wirkung des Globalen Wandels, Ursachen und Risiken von Naturgefahren, substanziell bei und unterstützt somit Maßnahmen gegen Verlust von Biodiversität, Lebensraum und Ökosystemfunktionen.

Im Folgenden werden die Beiträge der Erdmessung zunächst exemplarisch für einige der wichtigsten Herausforderungen erläutert:

### a) Ursachen und Wirkung des Globalen Wandels

Mit der Klimaänderung sind bereits jetzt dramatische Auswirkungen auf unsere Umwelt und unser Dasein verbunden. So wird vermutet, dass mit der globalen Erwärmung häufigere und stärkere Hitzewellen einhergehen. Die Hitzewelle 2003 in Westeuropa wird für geschätzte zusätzliche 35.000 Sterbefälle verantwortlich gemacht (Dixon 2017, § 2). Ozeanerwärmung und Meeresspiegelanstieg werden zu häufigeren Überflutungen und stärkeren Wirbelstürmen – den verlustreichsten Naturkatastrophen – beitragen. Die Erdmessung ermöglicht eine hypothesenfreie, von Annahmen numerischer Modelle unabhängige Quantifizierung des Meeresspiegelanstiegs (WCRP Global Sea Level Budget Group 2018). Sie berücksichtigt die Massenbilanz von Gletschern und Eis-

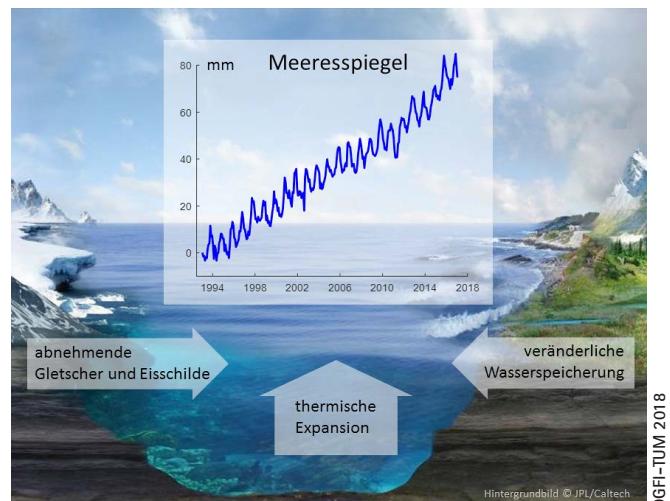


Abb. 1: Änderung des globalen mittleren Meeresspiegels. Die Kurve zeigt Ergebnisse der Satellitenaltimetrie.

schilden (Shepherd et al. 2018) und Veränderungen der terrestrischen Wasserreservoirs. Die Erdmessung liefert damit wesentliche Grundlagen zum besseren Verständnis der Wechselwirkung zwischen Veränderungen im Erdsystem und globaler Erwärmung. Diese Daten werden unter anderem genutzt, um numerische Modelle zu kalibrieren und so die Vorhersagefähigkeit zu verbessern.

### b) Ursachen und Risiken von Naturgefahren

Ein hochgenaues geodätisches Monitoring in Echtzeit ist bei drohenden Vulkanausbrüchen notwendig, um beispielweise die Aufwölbung der Erdoberfläche durch die Expansion von Magmakammern zu erkennen (Dvorak und Dzurisin 1997). Für andere Naturgefahren, wie sie beispielsweise in Erdbebenzonen gegeben sind, geben geodätische Messungen Auskunft über den langsamten Spannungsaufbau in der Erdkruste. In jüngster Zeit bieten GNSS<sup>1</sup>-Messungen in genauerer Echtzeit und hoher zeitlicher Auflösung neue Möglichkeiten des Monitoring von Erdbeben. Alpine Naturgefahren, wie Hangrutschungen, Bergstürze, Schuttströme und Lawinen, haben in den letzten 50 Jahren mehr als 4000 Menschenleben gekostet und ca. 50 Milliarden Euro an Schaden im Bereich der europäischen Alpen verursacht (Pfurtscheller und Thielen 2013). Schwindender Permafrost im Hochgebirge führt zu Hangentfestigungen und erhöhtem Schadensrisiko. Eine permanente hochgenaue Überwachung der Risikozonen ist Voraussetzung für Vorhersagemodelle. Ein anderes Beispiel ist mit der Überwachung des Weltraumwetters und insbesondere Extremereignissen, wie Sonnenstürmen, mit geodätischen Raumverfahren gegeben. Solche Ereignisse bergen große Risiken für satellitenbasierte Kommunikations- und Navigationsinfrastruktur in sich. Auch in vielen anderen Fällen tragen geodätische Messungen zum Verständnis der physikalischen Prozesse bei, die Naturgefahren zugrunde liegen.

<sup>1</sup> Global Navigation Satellite Systems

Eine große Herausforderung liegt darin, das Verständnis von Prozessen in der Vorhersagemöglichkeit etwa von Tsunamis und Erdbeben zu übertragen.

### c) Maßnahmen gegen den Verlust von Biodiversität, Lebensraum und Ökosystemfunktionen

Etwa 60 % der Weltbevölkerung lebt in Küstenregionen und fast alle Megastädte befinden sich an Küsten. Mit dem globalen Anstieg des Meeresspiegels und begleitenden Effekten, wie zunehmender Erosion, Versalzung oder häufigeren und stärkeren Sturmfluten, ist ein immenser Verlust an Biodiversität und Ökosystemfunktionen verbunden, aber auch die wirtschaftliche Ertragskraft von betroffenen Staaten kann signifikant betroffen sein. Maßnahmen, wie Adaption oder auch das Aufgeben von Küstenregionen, bedingen nicht allein globale, sondern regionale Projektionen des Meeresspiegelanstiegs (Cazenave und Le Cozannet 2014). Erst die Erdmessung ermöglicht die permanente und flächendeckende Überwachung des Meeresspiegels mit Hilfe von Altimetersatelliten (Legeais et al. 2018) in Verbindung mit Pegelmessungen an den Küsten sowie dem Monitoring von Krustendeformationen im Küstenbereich (Karegar et al. 2017). Mittels schwerefeldbasierter Bestimmung der Massenvariationen im Ozean lassen sich die einzelnen Beiträge, die Meeresspiegelveränderungen verursachen, trennen und es kann ein umfassendes Prozessverständnis erreicht werden (Rietbroek et al. 2016).

## 3 Beobachtung des Erdsystems 2030

Internationale Organisationen und politische Prozesse setzen Rahmenbedingungen, die neue Herausforderungen für die Erdmessung bedeuten. Die im Jahr 2015 verabschiedete UN-Resolution »Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development« (UN 2015, 2016) verpflichtet die Mitgliedstaaten zu international koordinierten Anstrengungen für die Weiterentwicklung der globalen geodätischen Infrastruktur und der nachhalti-

gen Nutzung der Daten. Die Sachstandsberichte des »Intergovernmental Panel on Climate Change« (IPCC 2014) sind zu Wegmarken und Taktgebern für die Forschung rund um Klimaänderungen geworden. Deutsche Geodäten gestalten diese internationalen Entwicklungen über zahlreiche Schlüsselpositionen in Organisationen, Gremien und Arbeitsgruppen entscheidend mit und generieren als Langzeitaufgabe geodätische Kernprodukte im Rahmen zahlreicher internationaler Dienste der IAG.

Globale Referenzsysteme, genaue Satellitenbahnen und präzise Topographie- und Schwerefeldmodelle liefern sowohl einen geometrischen als auch physikalischen Bezugsrahmen und bilden die Voraussetzung, um Prozesskomponenten im System Erde quantitativ erfassen zu können. Zahlreiche Anwendungen, die sich auf einen globalen oder regionalen Referenzrahmen stützen (Positionierung, Navigation, GIS<sup>2</sup>, Telekommunikation), benötigen Konsistenz und echtzeitnahe Verfügbarkeit. Das derzeitige globale geodätische Beobachtungssystem (Global Geodetic Observing System, GGOS; Plag und Pearlman 2009) der IAG muss in diesem Sinne, einschließlich des Beitrags anderer Disziplinen, weiterentwickelt werden. Es sollte zu einem integralen Bestandteil des GEOSS<sup>3</sup> ausgebaut werden, und es sollte so den vom UN Committee of Experts on Global Geospatial Information Management eingeforderten Globalen Geodätischen Referenzrahmen (Global Geodetic Reference Frame, GGRF) realisieren. Dabei spielt die konsistente Kombination und Interpretation geometrischer und gravimetrischer Beobachtungsverfahren eine zentrale Rolle (IAG 2016).

Ein operationelles globales geodätisches Beobachtungssystem sollte bis 2030 realisiert sein. Es soll erlauben, an jedem Ort der Erde zu jeder Zeit und mit wenigen Kilometern Auflösung relevante Größen zur Bearbeitung der großen Herausforderungen zu messen.

2 Geographisches Informationssystem

3 Global Earth Observing System of Systems



Abb. 2:  
Geodätisches Observatorium Wettzell

Ein solches System besteht aus boden- sowie weltraumgebundenen Observatorien und Messsystemen sowie den zu deren Betrieb, Datenhaltung, -verteilung und -analyse notwendigen Infrastrukturen.

Der nachhaltige Betrieb und die Weiterentwicklung der geodätischen Messverfahren und Observatorien sowie die nachgelagerte Datenhaltung und Datenanalyse sind zentrale Zukunftsaufgaben. Geodätische Beobachtungsstationen, die alle relevanten Beobachtungsverfahren betreiben, spielen eine zentrale Rolle zur Realisierung von globalen Referenzsystemen. Mit dem Geodätischen Observatorium Wettzell, seit vielen Jahren technologischer Vorreiter und Kernstation im globalen GGOS-Beobachtungsnetz, spielt Deutschland auf internationaler Ebene eine führende Rolle, die sich auch aus der Tatsache ergibt, dass die gesamte Prozesskette von der Rohbeobachtung bis zum (geodätischen) Endprodukt durch die Expertise der deutschen Erdmessung abgedeckt ist.

**Aufgrund der vorhandenen geodätischen Expertise sollte Deutschland weiterhin eine internationale Führungsrolle bei der Realisierung eines globalen geodätischen Beobachtungssystems anstreben.**

#### 4 Erdmessung als wissenschaftliche Disziplin: Status und Problemfelder

Paradigmenwechsel haben sich in der Erdmessung immer durch die Entwicklung neuer Technologien ergeben, die ihrerseits die Erfassung von bislang nicht beobachtbaren Phänomenen und damit die Entwicklung neuer Anwendungen bis hin zu ganz neuen Teilgebieten in anderen Geowissenschaften ermöglichten (Kaula 1969, Plag und Pearlman 2009). Solche Technologiesprünge haben in der Erdmessung meistens die Entwicklung neuer Richtungen und neue Erkenntnisse nach sich gezogen. Beispiele dafür waren der Nachweis der Plattentektonik, die genaue Erfassung der Kontinentalbewegung und von Plattendeformationen mit geodätischen Weltraumverfahren in den 1980er Jahren (Carter und Robertson 1992), die Entwicklung des GPS-Systems zu einem globalen Monitoring-system in den 1990ern und die flächenhafte Erfassung des Meeresspiegels mit mm-Genauigkeit seit der Jahrtausendwende. Die Schwerfeldmissionen zur Ausmessung von globalen Massentransportprozessen (Kusche et al. 2014), die Messung von Höhen- und Potenzialunterschieden mittels hochgenauer Uhren und entsprechender optischer Links sowie die präzise Übertragung von Zeit und Frequenz weltweit (Flury 2017, Müller 2017) sind beispielhaft für die ersten zwei Dekaden des 21. Jahrhunderts.

Die Erdmessung trägt signifikant zum Monitoring von physikalisch induzierten Prozessen im System Erde bei, in genauerer Echtzeit und auf allen relevanten räum-

lichen Skalen. Sie liefert insbesondere Beobachtungen (Änderungen von Masse, Volumen, Drehimpuls), die für andere Disziplinen wichtige Grundlageninformationen bedeuten.

Durch Integration und Assimilation der Beobachtungen in hochauflöste Erdsystemmodelle erschließt die Geodäsie systematisch Informationen über Erdsystemprozesse und bedient damit verschiedene Anwendungsfelder mit hohem gesellschaftlichen, volkswirtschaftlichen und wissenschaftlichen Nutzen (Kumar et al. 2016, Schumacher et al. 2018).

Es gibt eine Reihe von Herausforderungen, denen sich die deutsche Erdmessung stellen muss, um ihre international federführende Position vor dem Hintergrund der in Abschnitt 1 adressierten »Grand Challenges« und dem in Abschnitt 2 skizzierten Ziel der konsistenten Beobachtung des Erdsystems bis zum Jahr 2030 behalten oder sogar weiter ausbauen zu können.

**1. Interaktion mit der Öffentlichkeit:** Der wissenschaftlichen Gemeinde gelingt es nicht immer in ausreichendem Maße, die gesellschaftliche Bedeutung der Disziplin Erdmessung und deren unbestreitbaren internationalen Erfolge in die Öffentlichkeit und in den Aufmerksamkeitsbereich von Politik und Presse zu bringen: Begriffe wie die »Realisierung eines globalen Referenzsystems« sind präzise, aber hochgradig abstrakt; dazu kommt, dass die Infrastruktur dieses Referenzsystems für die meisten Bürger unsichtbar ist. Würde man z.B. von der »kontinuierlichen Bereitstellung eines global verteilten hochpräzisen Netzes von Hightech-Beobachtungsstationen, an die sich jeder Nutzer anschließen kann« sprechen, wird die Bedeutung besser sichtbar.

**2. Ökonomischer Wert geodätischer Produkte:** Geodätische Produkte werden durch internationale Dienste im Global Geodetic Observing System öffentlichen und kommerziellen Nutzern regelmäßig frei zugänglich gemacht und vielfältig, oft täglich, genutzt, ohne dass diese die umfangreiche Beobachtungsinfrastruktur und Expertise zur Ableitung dieser Produkte kennen. Die Wissenschaft hat bis auf wenige Ansätze noch nicht den Versuch unternommen, den ökonomischen Wert dieser Informationen zu quantifizieren.

**3. Kommunikation schwieriger Zusammenhänge:** Geodaten sind es gewohnt, ihre Ergebnisse und Anforderungen in Form von Unsicherheiten anzugeben; dieser wissenschaftliche Ansatz ist allgemein schwierig für Nichtwissenschaftler nachzuvollziehen. In diesem Zusammenhang wirkt erschwerend, dass der globale Referenzrahmen mit sehr hoher Genauigkeit verfügbar gehalten werden muss und es muss kommuniziert werden, warum mm-Genauigkeit für Referenzstationen und Satellitenantennen erforderlich ist. So kann man leichter vermitteln, dass man für einen 50 Jahre umfassenden Planungszeitraum zwischen einem prädictierten Meeresspiegelanstieg von 20 cm oder 50 cm unterscheiden möchte, weil dies mit massiven

ökonomischen Konsequenzen verbunden ist; eine einfache Rechnung zeigt, dass der globale Bezugsrahmen dazu mit einer Genauigkeit von 0,1 mm pro Jahr realisiert werden muss. Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass es eine enorme Herausforderung darstellt, mm-Genauigkeit auf einem hochdynamischen Erdkörper zu realisieren.

4. *Wissenschaftlicher Nachwuchs:* Die Erdmessung in Deutschland ist mit acht Universitäten, die eigene Geodäsie-Studiengänge betreiben, relativ breit aufgestellt. Dennoch ist der Mangel an qualifizierten Nachwuchswissenschaftlern eines der drängendsten Probleme an Universitäten und Forschungseinrichtungen, da das deutsche Wissenschaftssystem jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern bekanntlich wenig dauerhafte Perspektiven anbietet.

## 5 Schritte zu einer Erdmessung 2030

### 5.1 Technologische Entwicklung (Beobachtungssysteme)

#### Begriffsbestimmung und Motivation

Die Vermessung der Erde als dynamisches Objekt auf allen räumlichen und zeitlichen Skalen, mit dem Ziel der Beschreibung der wirkenden Prozesse wie auch die genaue Positionierung von Satelliten, Flugzeugen, Schiffen bis hin zu autonomen Kraftfahrzeugen, erfordert Beobachtungssysteme zur homogenen und kontinuierlichen Messung geometrischer und physikalischer Größen mit hoher Genauigkeit und Langzeitstabilität. Diese Beobachtungssysteme können nur durch langfristig angelegte Observatorien realisiert werden, an denen verschiedene, sich ergänzende Messtechniken kombiniert sind.

Satellitenmessungen sind in vielen Regionen der Welt, in denen terrestrische Beobachtungssysteme aus ökonomischen oder politischen Gründen nicht oder nicht hinreichend betrieben werden können, die einzige Quelle von unabhängiger Information geodätischer Größen. Die Radaraltimetrie für die Überwachung von Inlandgewässern kann hier als ein Beispiel gelten (Schwak et al. 2015).

#### Stand in Deutschland und im internationalen Kontext

Deutschland verfügt über eine vergleichsweise große Beobachtungskapazität mit einem Instrumentarium, das die meisten Gebiete der globalen geodätischen Forschung abdeckt. So sind alle punktweisen geometrischen Welt Raumverfahren (VLBI<sup>4</sup>, GNSS, SLR/LLR<sup>5</sup> und DORIS<sup>6</sup>) durch deutsche Observatorien und nachgelagerte Prozessierungskanäle an Forschungseinrichtungen und Universitäten für eine wissenschaftliche Gewinnung und Auswertung nutzbar. Besonders ist hier das Geodätische Observatorium Wettzell im Bayerischen Wald zu erwähnen,

das gemeinschaftlich vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie und der Technischen Universität München betrieben wird und betreffend Messdichte und Zuverlässigkeit weltweit seinesgleichen sucht. An dieser Fundamentalstation und auch an anderen deutschen Messstationen, wie der SLR-Station des Deutschen GeoForschungszentrums in Potsdam, sind Genauigkeiten von wenigen Millimetern im globalen Rahmen erreichbar.

Bei der globalen Beobachtung des Schwerefeldes steht die deutsche geodätische Wissenschaft durch umfangreiche Beteiligungen an den GRACE<sup>7</sup>, GOCE<sup>8</sup> und GRACE Follow-On Satellitenmissionen im Zentrum der Entwicklungen. Sie spielt auch bei der Entwicklung neuartiger zukünftiger Missionskonzepte und der Neu- und Weiterentwicklung von Messtechnologien eine internationale Vorreiterrolle. Die globalen Schwerefeldmessungen schöpfen heutzutage ihren Mehrwert aus einer zuverlässigen Erfassung und Quantifizierung der zeitlichen und räumlichen Veränderungen sowie aus den Interpretationsmöglichkeiten in Bereichen der Hydrologie (Kusche et al. 2016, Scanlon et al. 2018), Glaziologie (Shepherd et al. 2012, Farinotti et al. 2015), Ozeanographie (Rietbroek et al. 2016) und Geophysik (Pail et al. 2015). Der globale Charakter der Fragestellungen wie auch der Messverfahren setzt dabei intensive Kooperationen mit internationalen Forschergruppen voraus. Die Erfolge werden durch zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen und maßgebliche Positionen in internationalen Forschungsorganisationen eindrücklich dokumentiert (Geodesist's Handbook, Drewes et al. 2016).

Ergänzt werden die globalen Beobachtungen durch zahlreiche terrestrische Beobachtungssysteme, wie Absolut- oder Supraleitgravimeter, die zwar eine sehr hohe Genauigkeit, jedoch nur eine punktuelle globale Abdeckung haben. Deutschland ist in der terrestrischen Gravimetrie sehr gut aufgestellt (Neumeyer et al. 2008, Wilmes et al. 2016). Ebenfalls kann das in Deutschland sehr dichte und genaue terrestrische Referenzstationsnetz für GNSS-Satellitenbeobachtungen genannt werden.

Dagegen beginnt die deutsche Geodäsieforschung erst langsam, vorhandene Möglichkeiten auf dem Gebiet des Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) zu erkunden. Dies liegt unter anderem daran, dass bisherige Missionen immer eigenständig von internationalen Weltraumagenturen, wie ESA<sup>9</sup> oder NASA<sup>10</sup>, oder nationalen Agenturen, wie DLR<sup>11</sup> oder JAXA<sup>12</sup>, betrieben wurden

4 Very Long Baseline Interferometry

5 Satellite/Lunar Laser Ranging

6 Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

7 Gravity Recovery and Climate Experiment

8 Gravity field and Ocean Circulation Explorer

9 European Space Agency

10 National Aeronautics and Space Administration

11 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

12 Japan Aerospace Exploration Agency

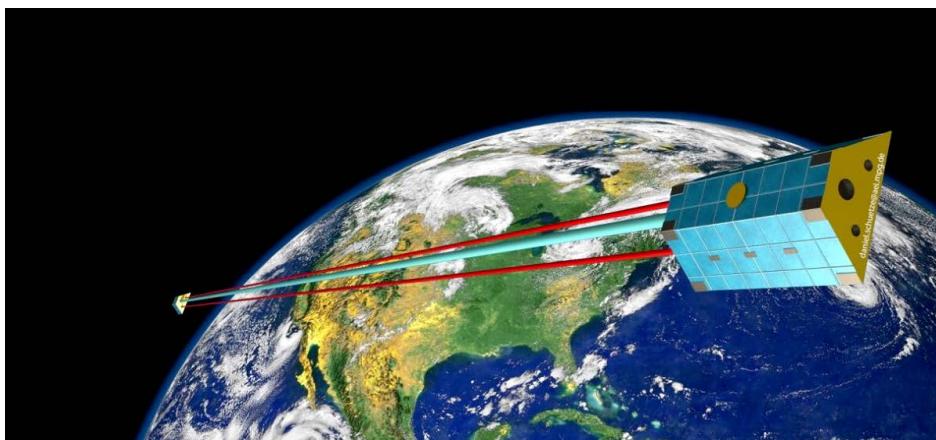


Abb. 3:  
Globale Beobachtung von  
Massentransportprozessen  
mittels GRACE/GRACE-FO

und die Einbindung universitärer Wissenschaftler und Institute wie auch die Verfügbarkeit der Daten nur unter bestimmten Bedingungen möglich war, auch weil die Daten kommerziell genutzt werden. Eine grundlegende Änderung in Bezug auf allgemeinen Zugang zu Messungen und Daten ist seit Kurzem bei den Sentinel-Fernerkundungssatelliten festzustellen, bei denen generell eine *open access data policy* betrieben wird.

Ähnliches kann auch für die Forschung auf dem Gebiet der Satelliten-Radaraltimetrie gesagt werden, die international weitgehend von NASA, ESA und der französischen Raumfahrtagentur CNES<sup>13</sup> vorangetrieben wurde. Mit neuen Technologien wie Delay-Doppler-Altimetrie oder Ka-Band-Messung findet hier derzeit eine Weiterentwicklung statt, sodass sich für deutsche Arbeitsgruppen eine Chance ergibt, zur Weltspitze aufzuschließen.

### Herausforderungen und Ziele

Aus den bereits genannten zukünftigen Herausforderungen bzw. dem Beitrag der Erdmessung zu ihrer Lösung leiten sich bestimmte Ziele für die technologische Entwicklung und die Weiterentwicklung von geodätischen Beobachtungsnetzen ab. Natürlich kann diese globale Aufgabe vielfach nicht von Deutschland allein, sondern nur im internationalen Kontext erfolgreich durchgeführt werden. Dennoch ist auf Basis der bestehenden Expertise eine führende Rolle Deutschlands bei internationalen Entwicklungen anzustreben (Schuh et al. 2016). Aktuelle Trends und Arbeitsfelder umfassen dabei:

- 1. Ausbau und Weiterentwicklung geodätischer Observatorien:** Für die eingangs beschriebenen Aufgaben können bei den vier geodätischen Weltraumverfahren – GNSS, SLR/LLR, VLBI, DORIS – diverse technologische Verbesserungsmöglichkeiten genutzt werden, die möglichst an allen Observatorien implementiert werden sollten. Dem verstärkten Aufbau und der Weiterentwicklung von geodätischen Observatorien (Fundamentalstationen) als Orte der lokalen Verknüpfung verschiedener Messverfahren, aber auch als Kalibrierpunkte, wird in Zukunft eine noch größere Bedeutung

beizumessen sein. Dies gilt sowohl für die geometrischen Punktverfahren als auch für Schweremessungen (Plag und Pearlman 2009).

- 2. Nachhaltiges Beobachtungssystem des Schwerefeldes:** Nachfolgemissionen der gegenwärtigen Schwerefeld-Satellitenmissionen sind unerlässlich zur kontinuierlichen und homogenen globalen Vermessung des Erdgeschwerefeldes und dessen Variationen. Dabei müssen jedoch noch größere räumliche und zeitliche Skalen abgedeckt werden. In Deutschland sind bereits entsprechende zukunftsweisende Missionskonzepte in Ausarbeitung (Pail et al. 2015, Douch et al. 2018).
- 3. Verstärkte Einbeziehung von SAR/InSAR:** In der Zukunft muss die Bestimmung von Einzelpunkten vermehrt durch flächenhafte Verfahren ergänzt werden. SAR und InSAR sollen für die Erdmessung und globales Monitoring verstärkt genutzt und mit Referenzpunktmessungen kombiniert werden. Dabei spielen die globalen Messdaten der Sentinel-1-Satelliten des Copernicus-Projektes der EU eine wichtige Rolle.
- 4. Integration von Beobachtungsverfahren:** Die Qualität der Referenzrahmen wird sich entscheidend verbessern lassen, wenn zusätzlich zu den Verbindungsmessungen zwischen den Messverfahren an der Erdoberfläche (Ko-lokation) auch im Weltraum, z.B. auf Satelliten oder an der Mondoberfläche, realisierte Verknüpfungsmessungen verfügbar werden. In Zukunft sollen dazu dedizierte (Mini-)Satelliten genutzt werden, um die Messsysteme aller geometrischen Verfahren zu unterstützen, wobei diese speziell nach geodätischen Prinzipien und Erkenntnissen konzipiert werden müssen.
- 5. Höhendatum:** Für das Monitoring von Naturgefahren und der Folgen des Klimawandels muss insbesondere die Stabilität des geodätischen Höhendatums, also die Höhenreferenz, auf globaler und regionaler Ebene verbessert und bestehende Inhomogenitäten und Inkonsistenzen minimiert werden (Ihde et al. 2017). Dies bedingt die Verfügbarkeit eines weltweit gut verteilten Stationsnetzes mit adäquatem Messinstrumentarium, um durch Verknüpfung der weltraumgeodätischen Messtechniken die verschiedenen geometrischen und gravimetrischen Realisierungen der Bezugssysteme konsistent zu verbinden.

13 Centre national d'études spatiales

6. *Zeit und Frequenz:* Eine Vielzahl von geodätischen Beobachtungstechniken lässt sich auf hochgenaue Messung von Zeit bzw. Zeitdifferenzen zurückführen, wodurch hier der Synchronisation von Uhren eine zentrale Bedeutung zukommt. Die durch innovative Entwicklungen bei den Zeit- und Frequenzübertragungstechniken (Schreiber und Kodet 2018) möglich werdende präzise Synchronisation von Messsystemen und Observatorien wird es erlauben, die Zeitmessung als zusätzliche geodätische Observable zu nutzen. Mittelfristig werden diese Techniken zusammen mit der Realisierung hochstabiler Uhren zu einem globalen Netz synchronisierter Uhren führen und ermöglichen, die geodätischen Weltraumverfahren noch wesentlich genauer als heute unter der kompletten Berücksichtigung der relativistischen Modelle zu behandeln.
7. *Neue Messkonzepte:* Die GNSS-Reflektometrie wird als neue Messtechnik mit global verteilten Beobachtungen von Flugzeugen oder Weltraummissionen Beiträge zum Monitoring des Meeresspiegels und anderer Parameter liefern, die für die Beobachtung von Naturgefahren und des globalen Wandels von Bedeutung sind.
8. *Neue Sensoren:* Die Entwicklung neuer Sensoren (Müller 2017), wie etwa Quantengravimeter, optische Uhren, Quantenkreisel, sowie die unter (6) angesprochene verlustfreie Übertragung von Zeit und Frequenz mittels Glasfaser über große Distanzen, eröffnet eine neue Dimension zur geodätischen Vermessung der Erde, wie z.B. die punktweise Messung von Potenzialunterschieden mittels Uhren unter Nutzung der relativistischen Geodäsie und deren Kombination mit entsprechenden klassischen Messverfahren (Müller et al. 2018).

## 5.2 Methodik, Analyse und Modellbildung

### Begriffsbestimmung und Motivation

Die methodischen Grundlagen der Erdmessung stützen sich weitgehend auf die mathematisch-physikalische Modellbildung, die zur vollständigen und konsistenten Beschreibung von Geometrie, Rotation und Schwerefeld der Erde einschließlich der Ozeane und Atmosphäre und deren Wechselwirkungen notwendig sind. Da die Beobachtungsgrößen der Erdmessung von der Gangrate hochgenauer Uhren, über die Ausbreitung von Mikrowellen- oder Lasersignalen in der Atmosphäre bis hin zur Bewegung von Satelliten und des Mondes oder zur Strahlung von Quasaren reichen, ist die Erdmessung nicht nur mit der Mathematik und Physik, sondern auch mit Astronomie, Luft- und Raumfahrt und den benachbarten Geowissenschaften eng verbunden. Daneben steht die Analyse von Messungen, also die optimale Interpretation von oft unüberschaubar großen, gelegentlich unvollständigen oder widersprüchlichen, immer mit Messrauschen behafteten Datenmengen vom Sensor bis zur Integration in numerische Prozessmodelle im Vordergrund. Auch hier

sind Verknüpfungen zur Mathematik und Numerik sowie zur mathematischen Statistik und Informationstheorie sehr wichtig.

Die atemberaubenden Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich der Sensorik und der raumgestützten Beobachtungsverfahren erfordern parallel eine konsequente Weiterentwicklung von geodätischer Methodik und Analyse.

Das Spektrum der erfassbaren Erdsystemparameter und die Genauigkeit ihrer Bestimmung konnte durch neue und präzisere Messverfahren deutlich gesteigert werden; eine konsistente Analyse muss aber nun zunehmend komplexe physikalische Wechselwirkungen im Erdsystem nachbilden, die teils nicht gut bekannt sind und sich nur mit immer komplexeren geowissenschaftlichen Simulationsmodellen repräsentieren lassen.

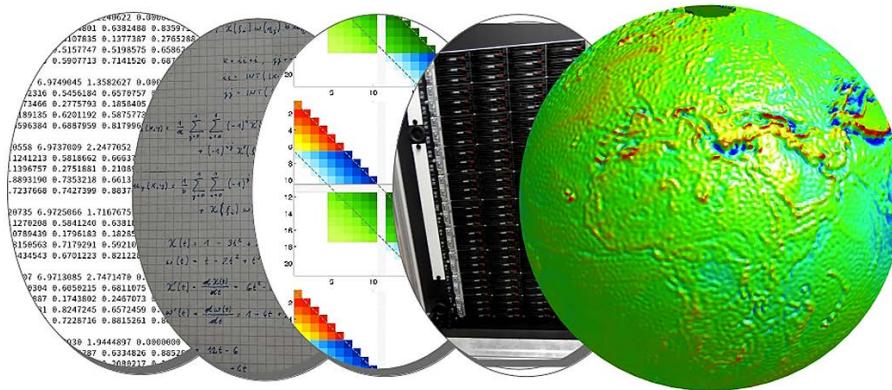
Neben Modelldefiziten beinhaltet auch der Messvorgang selbst zusätzliche Unzulänglichkeiten. Komplexe Messsysteme, unklare Interaktionen zwischen einem Messsystem und dessen unmittelbarer Umgebung, Unsicherheiten im Bezugssystem aber auch der Versuch, aus den Messungen latente Parameter abzuleiten, erhöhen die Komplexität der Modellbildung.

Maßgeschneiderte Dekorrelationsfilter und Parameter- und Varianzschätzverfahren müssen kontinuierlich weiterentwickelt werden, um mit Millionen oder sogar Milliarden von Datenpunkten eine flexible Modellbildung zu gewährleisten. Durch Simulationsrechnungen werden Modelle adaptiv an die Daten angepasst und verfeinert. Trotz des Einsatzes von massiv parallelen Rechnersystemen und optimierten Algorithmen sind Rechenzeiten von mehreren Wochen für eine einzige Simulation keine Seltenheit.

### Stand in Deutschland und im internationalen Kontext

Deutsche Arbeitsgruppen haben insbesondere in den Bereichen der Konstruktion und Kombination von globalen Referenzrahmen, der Modellierung von Potenzialfeldern und der stochastischen Modellierung von komplexen Messgrößen der Erdmessung international sichtbare Beiträge geleistet. Dies wird beispielsweise durch die vielfältige Teilnahme deutscher Gruppen in den Analysezentren der internationalen Dienste der IAG dokumentiert.

Höchstleistungsrechner mit hunderttausenden Rechenkernen stehen heute zur Verfügung. »High Performance Computing« und »Massiv parallele Programmierung« erlauben die Bearbeitung realitätsnaher Modelle in der Geodäsie sowie den Aufbau von Simulationsumgebungen. Die volle Nutzung dieser Systeme erfordert die konsequente Formulierung aller Algorithmen für die parallele Verarbeitung unter Berücksichtigung der verteilten Speicherung. Im Bereich der Geodäsie sind erste Zugänge zum Hochleistungsrechnen auf verteilten Systemen in den Bereichen Schwerefeldprozessierung und der Modellierung der dynamischen Ozeantopographie bereits erfolgt. Junge Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen



Courtesy Wolf-Dieter Schuh, Bonn

**Abb. 4:**  
Schematische Prozessierungs-  
kette von den rohen Beobachtun-  
gen zum Schwerefeldmodell

sind in Deutschland sehr gut ausgebildet, um diese innovativen Rechnerarchitekturen zu nutzen.

In Zusammenarbeit mit den anderen Disziplinen der Erdsystemforschung (Hydrologie, Ozeanographie, Meteorologie, ...) werden in der geodätischen Erdsystemforschung integrierte Modellsysteme auf Hochleistungsrechnern entwickelt und implementiert. Zurzeit stehen dabei vielfach gekoppelte Vorförderungssysteme im Fokus, und der Abgleich zwischen Messungen und Simulationsmodell wird zur Korrektur der Modellparameter verwendet. Neben Datenassimilationsverfahren gibt es in der Geodäsie sehr weit entwickelte Ansätze im Bereich der inversen Modellierung, bei der die Parameter direkt aus den Messungen abgeleitet werden. In der Zusammenführung dieser Ansätze ist noch erheblicher Forschungsbedarf gegeben.

Da geodätische Produkte in der Regel durch inverse Modellierung direkt aus den Messdaten abgeleitet werden, ist es möglich, darüber hinaus deren Unsicherheiten und Korrelationen abzuschätzen und zur Verfügung zu stellen, sodass Nutzer deren Zuverlässigkeit einschätzen und diese auch für daraus abgeleitete Produkte angeben können. Allerdings erlaubt erst die konsistente Beschreibung aller Mess- und Modellunsicherheiten eine vollständige Integration der unterschiedlichen Modelle und Messungen.

### Herausforderungen und Ziele

Im Bereich der Methodik, Analyse und Modellbildung zeichnen sich folgende zukünftige Forschungsfelder ab:

**1. Konsistente Beschreibung von Unsicherheiten:** Während es sehr gut gelingt, die inneren oder formalen Unsicherheiten im Modell zu erfassen, ist es oftmals extrem schwierig, die durch Modelldefizite hervorgerufenen äußeren Unsicherheiten abzuschätzen (Vishwakarma et al. 2017). Bei der Auswertung einzelner Beobachtungstypen wird von den Modellen der Freiraum von latenten, schlecht erfassbaren Parametern ausgenutzt, um Modelldefizite zu verbergen. Oftmals wird bewusst eine Überparameterisierung durchgeführt. Dabei zeigt es sich, dass die Schätzwerte für diese durch den Beobachtungstyp schlecht erfassten Parameter systematisch verfälscht werden. Durch die

Integration von komplementären Beobachtungstypen in das Modell steht der Freiraum der vormals schlecht bestimmten Parameter im kombinierten Modell nicht mehr in der ursprünglichen Form zur Verfügung. Somit kommt es zum Konflikt zwischen falsch zugewiesenen Informationen mit den komplementären Beobachtungstypen. Nur durch eine konsistente Unsicherheitsbeschreibung ist es möglich, diesen Konflikt aufzulösen und Modelldefizite aufzuzeigen.

2. **Modellbildung:** Speziell bei komplexen Modellen mit heterogenen Datentypen ist somit zusätzliche Sorgfalt bei der Modellbildung erforderlich. Dabei handelt es sich oft um sehr umfangreiche Datensätze mit unterschiedlichen Bezugssystemen und komplexen Entstehungsgeschichten. Konsistente, vollständige Modelle erfordern sowohl eine gewissenhafte Parameterisierung der funktionalen Zusammenhänge zwischen den Datentypen und den Modellparametern wie auch eine vollständige stochastische Beschreibung der Unsicherheiten der Daten und der Modellfehler.
3. **Raum-zeitliche Modellierung:** Forschungsbedarf besteht nach wie vor bei der Approximation und Interpolation im ein- bis vierdimensionalen Raum, wobei skalare und multivariate Anwendungen, Beschreibung von Potenzialfeldern bzw. Lösung von partiellen Differentialgleichungen mit Hilfe von globalen und lokalen Basisfunktionen, wie Kugelfunktionen, radialen Basisfunktionen, Finiten Elementen oder Splines, eine besondere Rolle spielen (Tourian et al. 2017). Dies führt in der Regel zu hoch-dimensionalen dynamischen Systemen mit dünnbesetzten Gittern bzw. dünnbesetzten Funktionensystemen.
4. **Verbesserte Raum-Zeit-Parametrisierung:** Eine korrekte parametrische Beschreibung des Raum-Zeit-Verhaltens ist in vielen Teilenbereichen der geodätischen Erdsystemmodellierung, bei globalen Schwerefeldmodellen genauso wie bei terrestrischen Referenzrahmen, von zentraler Bedeutung, um das wahre Systemverhalten, abgetastet durch geodätische Beobachtungen, möglichst gut durch die Modellparameter zu beschreiben und systematische Fehler, wie z.B. Leakage-Effekte, zu vermeiden.
5. **Stochastische Modellierung:** Weiterentwicklungen in der Darstellung von stochastischen Zusammenhängen

sind notwendig, um multivariate, zeitvariable Effekte gezielt modellieren zu können. Hier sind sowohl Zugänge über Kovarianzfunktionen als auch über zeitdiskrete Prozesse zu untersuchen. Prozessanalysen sowohl im Ortsbereich als auch im Spektralbereich sollen zusätzliche Einblicke in das stochastische Verhalten vermitteln. Die so gewonnene Flexibilität in der Modellierung von Korrelationen kann dann für eine maßgeschneiderte Modellbildung genutzt werden.

6. *Konsistente Kombination:* Eine zentrale Aufgabe stellt die konsistente Kombination geometrischer und gravimetrischer Messgrößen zu hochwertigen, konsistent auf geometrische und gravimetrische Referenzflächen bezogenen Resultaten im Sinne des Global Geodetic Observing Systems der IAG dar (Wu et al. 2017). Dies erfordert umfangreiche methodische Weiterentwicklungen.
7. *Integrierte Modelle und Modellsysteme:* Die numerische Modellierung von Erdsystemkomponenten, also von Atmosphäre, Ozeanen, Hydrosphäre, Kryosphäre und fester Erde, vollzieht eine Entwicklung zu einer immer vollständigeren, konsistent gekoppelten Beschreibung der Massenflüsse innerhalb der Einzelkomponenten und der Wechselwirkungen zwischen diesen im Rahmen des Gesamtsystems (Bierkens et al. 2015). Bestehende Modellsysteme für die geodätische Erdsystemforschung, die numerische Modelle des Ozeans, der Atmosphäre und des terrestrischen Wasserkreislaufs, aber auch mechanische Modelle der Krustenelastizität sowie der viskoelastischen Reaktion des Erdkörpers auf glaziale Zyklen beinhalten, sind heute noch nicht in der Lage, geodätische Beobachtungen hinreichend genau vorherzusagen und zu interpolieren. Sie müssen daher in enger Zusammenarbeit mit den Nachbardisziplinen weiterentwickelt werden.
8. *High-Performance Computing:* Besonderes Augenmerk sollte der numerisch effizienten Umsetzung von Analyse- und Modellbildungsprozessen auf massiv parallelen Hochleistungsrechnern gewidmet werden, wobei spezielles Augenmerk auf die Parallelisierung der Algorithmen zu legen ist. Damit wird es möglich, komplexe Modellzusammenhänge parametrisch darzustellen, eine Kopplung von Sub-Systemen vorzunehmen und den Schätzprozess in einem Guss und unter Berücksichtigung von Korrelationen zwischen den Sub-Systemen konsistent durchzuführen.

### 5.3 Datenprodukte und Anwendungen

#### Begriffsbestimmung und Motivation

Die Erdmessung spielt eine zentrale Rolle in einer Wertschöpfungskette für Datenprodukte und Anwendungen. Deren Adressaten reichen von Experten der Geodäsie, z.B. für globale Referenzrahmen, über Nutzer aus wissenschaftlichen Nachbardisziplinen, z.B. für die Messung

der Meeresspiegeländerungen, bis zu Anwendern operationeller Dienste, etwa für das Katastrophenmanagement, und politischen Entscheidungsträgern. Da sich nicht zuletzt aufgrund der technologischen Weiterentwicklung und der Entwicklung neuer Auswertemethoden fortlaufend neue Daten, Erkenntnisse und Anwendungen ergeben, muss diese Kette flexibel gestaltet sein.

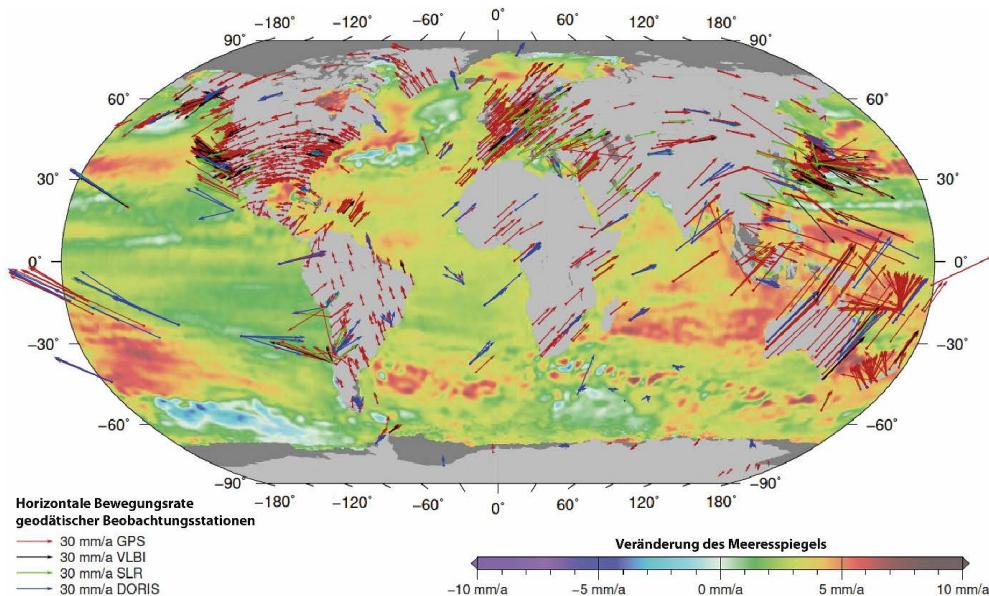
#### Stand in Deutschland und im internationalen Kontext

Die Forschungsarbeiten in Deutschland sind wegbereitend für Definition und Realisierungen von globalen und regionalen Referenzsystemen (Nothnagel et al. 2010, Seitz et al. 2016, siehe Journal of Geodesy Special Issue on Reference Systems 2018). In diesem Themenbereich sind Wissenschaftler aus Deutschland maßgeblich in Projekte und Gremien internationaler Organisationen eingebunden, unter anderem im Rahmen der Vereinten Nationen.

Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich vor allem auf die folgenden Schwerpunkte:

- die Bestimmung hochgenauer und langzeitstabiler Koordinaten geodätischer Messstationen durch Kombination unterschiedlicher Messverfahren;
- die Beschreibung zeitlicher Veränderungen der Stationspositionen aufgrund geodynamischer Prozesse (Bloßfeld et al. 2014, Sanchez und Drewes 2016);
- die Realisierung von terrestrischen Referenzsystemen mit hoher zeitlicher Auflösung (Bloßfeld et al. 2016) und in genäherter Echtzeit, um Stationsbewegungen (z.B. nach Erdbeben) mit höchstmöglicher Genauigkeit zu bestimmen;
- die verbesserte Realisierung des geodätischen Datums (Koordinatenursprung, Orientierung und Maßstab) (Wu et al. 2017);
- die Verknüpfung (Lagerung) von regionalen und globalen Referenzrahmen mit höchster Genauigkeit;
- die gemeinsame Realisierung vom globalen terrestrischen Referenzsystem und dem himmelfesten Referenzsystem einschließlich der zugehörigen Erdorientierungsparameter (Kwak et al. 2018);
- die Nutzung neuer Beobachtungstechnologien für die Steigerung der Genauigkeiten und die Ausweitung des Parameterraums.

Aufgrund ihres entscheidenden Anteils an der Planung, Durchführung und Auswertung der bisherigen Schwerefeld-Satellitenmissionen hat die deutsche Erdmessung große Verdienste bei der Bereitstellung globaler Schwerefeldlösungen, sowohl für das räumlich hochauflösende statische Schwerefeld (Pail et al. 2011, Scheinert et al. 2016; Pail et al. 2018) als auch für zeitliche Schwerefeldänderungen. Auf Basis der Schwerefeldmodellierung soll eine möglichst hohe Konsistenz zwischen Höhensystemen erreicht werden, die einerseits aus gravimetrischem Nivellement und andererseits aus der Kombination geometrischer Höhen mit Schwerefeldmodellen erhalten werden.



**Abb. 5:**  
Prozesse im Erdsystem,  
beobachtet mit geodätischen  
Methoden: Meeres-  
spiegeländerung und Drift  
der Kontinentalplatten

Courtesy: DGFI-TUM

Als Beispiel kann die Bereitstellung von physikalischen Höhenbezugsflächen, in Deutschland die Quasigeoide GCG2016 und EGG2016, genannt werden.

Die Integration geodätischer Ergebnisse in die interdisziplinäre Erdsystemforschung hat eine lange Tradition, angetrieben und koordiniert unter anderem durch das DFG-Schwerpunktprogramm »Massentransporte und Massenverteilungen im System Erde«, die DFG-Forschergruppen »Erdrotation und Globale Dynamische Prozesse« sowie »Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation in Space« und aktuell die DFG-Schwerpunktprogramme »Dynamic Earth« und »Regional Sea Level Change and Society«. Als Beispiele für Produkte, die u.a. im Rahmen dieser koordinierten Programme erstellt wurden und wesentlich von der Erdmessung profitierten, können verbesserte hydrologische Modelle genannt werden, die z.B. Daten von GRACE und der Radaraltimetrie assimilieren (Androsov et al. 2018). Zeitreihen der Ozeanmassen und des globalen Meeresspiegels (Legeais et al. 2018), geostrophische Meereströmungen aus rein geodätisch bestimmter Ozeantopographie und deren gesellschaftlichen und klimatischen Implikationen (Wouters et al. 2014), Wasserdampfprofile aus GNSS-Messungen, die operationell in die Wettervorhersage eingehen, Beobachtungen und Vorhersagen des Weltraumwetters (Erdogan et al. 2017) und seiner sicherheitsrelevanten Auswirkungen, z.B. auf Navigations-, Telekommunikations- und Energieversorgungssysteme, Massenbilanzschätzungen für die Eisschilde (Shepherd et al. 2018) und Gletschersysteme sowie verbesserte (z.B. inverse) Modellierung von Lithosphäre (Bouman et al. 2016) und von Prozessen der festen Erde, wie glazial-isostatischen Ausgleichsvorgängen (Groh et al. 2012, Sasgen et al. 2017), oder Erdbebenprozessen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle.

An Produkte und Anwendungen der Erdmessung werden steigende Anforderungen gestellt, etwa dass sie operationell bereitgestellt werden und langzeitig konsistent

sind. Freie Verfügbarkeit und leichte Zugänglichkeit sind zunehmend gefordert. Diese Forderung erfüllen die Sentinel-Missionen des Copernicus-Programms der EU und der ESA sowie die Earth Explorer-Missionen der ESA mit der kostenfreien Bereitstellung von Daten der Fernerkundung und Erdbeobachtung in bisher nicht gekanntem Umfang. Die dabei zu verarbeitenden Datenmengen wachsen enorm. Dies stellt neue Anforderungen an die Dateninfrastrukturen und Verarbeitungsprozesse. Es eröffnet aber auch das Potenzial, einen Informationsmehrwert aus der Fülle der verfügbaren Daten zu gewinnen (»Big Data«).

#### Herausforderungen und Ziele

- 1. Integrierte Produkte:** Die Analyse geodätischer Beobachtungsdaten aus unterschiedlichen Verfahren muss in einem integrierten Ansatz, gemeinsam mit »nicht-geodätischen Messungen« erfolgen. Denn die verschiedenen Messungen sind unterschiedliche, komplementäre Wiederspiegelungen derselben Erdsystemprozesse. Durch die integrierte Auswertung werden Datenprodukte in ihrer Zuverlässigkeit und Konsistenz verbessert und es lassen sich neuartige Datenprodukte entwickeln. Beispielsweise muss ein breites Spektrum an geodätischen Beobachtungstypen konsistent verbunden werden, um ein umfassendes Bild des globalen Wasserkreislaufs zu gewinnen. Hierzu gehören Messungen der Satellitenaltimetrie, des zeitvariablen und statischen Schwerefeldes, mit GNSS gemessene Deformationen der festen Erde, die insbesondere auflastbedingt sein können, und Messungen des Atmosphärenzustands.
- 2. Integrierte Referenzsysteme:** Für die konsistente Kombination geodätischer Verfahren muss die Trennung zwischen rein geometrischen Referenzrahmen und Höhenreferenzrahmen zugunsten eines konsistenten geometrisch-gravimetrischen Referenzsystems im Sinne

des GGRF-Positionspapiers der IAG (IAG 2016) überwunden werden.

3. *Einbeziehung komplementärer Verfahren und Produkte:* Verfahren der Fernerkundung, wie z.B. InSAR, können als Instrumente der Erdmessung betrachtet werden und müssen in die integrierte Auswertung einbezogen werden. Am Beispiel des globalen Wasserkreislaufs trägt die Fernerkundung zur Messung der Ausdehnung von Gewässern und Gletschern, von Fließgeschwindigkeiten von Flüssen und Gletschern, Deformationen der festen Erde, Bodenfeuchte und Atmosphärenparametern bei. Am Beispiel der GNSS-Meteorologie wird klar, dass die Grenzen zwischen geodätischen Messtechniken und Fernerkundungsverfahren heute fließend sind.
4. *Disziplinen-übergreifende Produkte:* Die Auswertung geodätischer Beobachtungen wird in Zukunft weit stärker als bisher mit der Modellierung von Erdsystemprozessen sowie mit der Verwendung nicht-geodätischer Daten verschmelzen (Sneeuw et al. 2014). Diese Verbindung wird einen erheblichen Mehrwert für das Prozessverständnis bringen. Aus geodätischer Sicht wurden Modelle von Erdsystemprozessen bis vor kurzem vielfach rein für die Korrektur geodätischer Datenprodukte herangezogen. Aus Sicht der Prozessmodellierung werden geodätische Rohdaten jedoch zunehmend als originäre Beobachtungsdaten verwendet. Die Rolle der Geodäsie in diesem Prozess der Erdsystem-Informationsgewinnung beschränkt sich bei Weitem nicht mehr auf das Zuliefern der geodätischen Beobachtungen. Denn einerseits wird nur eine fundierte Beschreibung von Unsicherheiten erlauben, den Analyseprozess optimal zu gestalten und die Unsicherheit der Ergebnisse, beispielsweise in der Klimaforschung, adäquat zu beschreiben. Andererseits können nur mit einem tiefen Verständnis des (Erdsystem-)Analyseprozesses die Widersprüche zwischen geodätischen Messgrößen und der Modellvorhersage aufgelöst und das zugrunde liegende Messsystem besser verstanden und weiterentwickelt werden. Eine Kernfrage klimabezogener Forschungen und Entscheidungsprozesse besteht dabei in der Trennung zwischen natürlicher Variabilität und anthropogenen Einflüssen. Hierfür ist es notwendig, Ensembles von freien Simulationen mit und ohne anthropogenen Effekten mit langen, konsistenten und integrierten Synthesen (Reanalysen, Datensimulation) von Beobachtungsdatensätzen zu vergleichen, die auch Fehlerangaben beinhalten.
5. *Echtzeit-Produkte und operationelle Services:* Insbesondere die wichtige Integration geodätischer Messungen in Frühwarnsysteme bedingt, dass zahlreiche für die Auswertung relevante Parameter in quasi Echtzeit vorliegen müssen. So muss beispielsweise die Weltzeit UT1, die die Schwankungen der Erdrotation charakterisiert, für die genaue Echtzeitauswertung von Satellitenmessungen ebenfalls in genauerer Echtzeit bestimmt und zur Verfügung gestellt werden. Wasser-

dampf und Elektronendichte, die mittels geodätischer Techniken mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung gemessen werden, werden in naher Echtzeit zur Vorhersage von Wetter und Weltraumwetter benötigt. Schwerefeldprodukte mit kurzer Latenzzeit von wenigen Tagen sind erforderlich für deren Integration in operationelle Services (z.B. Copernicus), etwa zur Vorhersage von Fluten und Dürren und für Anwendungen des Katastrophenmanagements.

6. *IAG-Dienste:* Das Betreiben bzw. die Beteiligung an den internationalen Diensten der IAG ist eine Langzeitaufgabe mit höchster gesellschaftlicher Relevanz, die kontinuierlich durch Forschungsarbeiten begleitet werden muss, um die Produktgüte weiterhin zu verbessern und auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft zu halten. Deshalb muss die zentrale Beteiligung deutscher Wissenschaftler und Forschungseinrichtungen an diesen Diensten auch in Zukunft sichergestellt werden.

## 6 Ausblick und Fazit

Die Erdmessung betreibt Grundlagenforschung, um Methoden zur Überwachung und Analyse von Veränderungsprozessen im System Erde zu entwickeln. Dabei wird die gesamte Kette von den Messkonzepten und der Beobachtungsinfrastruktur über die Analyse- und Modellierungsmethoden bis hin zu den Produkten und Anwendungen abgedeckt. Sie ist gut mit den anderen Geowissenschaften vernetzt, da viele Phänomene erfolgreich nur in interdisziplinärer Kooperation erforscht und verstanden werden können. Die Erdmessung befasst sich zunehmend mit anthropogenen Einwirkungen im System Erde und deren Trennung von natürlichen Variationen sowie den Wechselwirkungen zwischen anthropogenen und natürlichen Effekten, was den Austausch mit den Gesellschaftswissenschaften erfordert. Somit leistet die Erdmessung nicht nur wissenschaftliche Beiträge zur Erdsystemmodellierung, sondern unterstützt in erheblichem Maße die Formulierung konkreter Handlungsoptionen bei der Lösung gesellschaftlicher Fragen, wie z.B. einer modernen Infrastruktur, dem Ressourcenschutz, der Vermeidung von Wasserkrisen und dem Katastrophenmanagement.

Um ihre weitreichenden Aufgaben weiterhin erfolgreich und nachhaltig erledigen zu können, benötigt die Erdmessung:

- Investitionen zur Bereitstellung der geodätischen Infrastruktur (Observatorien auf der Erde, Satellitenmissionen);
- finanzielle Unterstützung zur Entwicklung innovativer Technologien, neuer Messkonzepte und Satellitentechniken;
- Förderprogramme zur Entwicklung der notwendigen Analyse- und Modellierungsverfahren;

- solide Grundfinanzierung von international anerkannten Langzeitaufgaben, wie die Bereitstellung eines globalen Referenzrahmens;
- Schaffung von Rahmenbedingungen zur Durchführung gezielter Forschung an Universitäten, begleitend zu den größeren Forschungseinrichtungen;
- dedizierte Ausbildung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses;
- geeignete Outreach-Maßnahmen, um die umfangreichen Leistungen der Erdmessung einem größeren Kreis bekannt zu machen.

## Literatur

- Androsov A., Nerger L., Schnur R., Schröter J., Albertella A., Rummel R., Savcenko R., Bosch W., Skachko S., Danilov S. (2018): On the assimilation of absolute geodetic dynamic topography in a global ocean model: impact on the deep ocean state. *Journal of Geodesy*. DOI: 10.1007/s00190-018-1151-1.
- Bierkens M.F.P., Bell V.A., Burek P., Chaney N., Condon L., David C.H., de Roo A., Döll P., Drost N., Famiglietti J.S., Flörke M., Gochis D.J., Houser P., Hut R., Keune J., Kollet S., Maxwell R., Reager J.T., Samaniego L., Sudicky E., Sutanudjaja E.H., van de Giesen N., Winsemius H., Wood E.F. (2015): Hyper-resolution global hydrological modeling: what is next? *Hydrol. Process.*, 29, 310–320.
- Bloßfeld M., Seitz M., Angermann D. (2014): Non-linear station motions in epoch and multi-year reference frames. *Journal of Geodesy* 88(1), 45–63. DOI: 10.1007/s00190-013-0668-6.
- Bloßfeld M., Seitz M., Angermann D. (2016): Epoch reference frames as short-term realizations of the ITRS – datum stability versus sampling. *IAG Symposia*, 143, 26–32. DOI: 10.1007/1345\_2015\_91.
- Bouman J., Ebbing J., Fuchs M., Sebera J., Lieb V., Szwilus W., Haagmans R., Novak P. (2016): Satellite gravity gradient grids for geophysics. *Nature Scientific Reports*, 6, 21050. DOI: 10.1038/srep21050.
- Carter W.E., Robertson D.S. (1992): Very-Long Interferometry Applied to Geophysics, Developments in astrometry and their impact on astrophysics and geodynamics. *Proceedings of the 156th Symposium of the International Astronomical Union held in Shanghai, China, Sept. 15–19, 1992*. Ed. by Ivan Istvan Mueller and Barbara Kolaczek. International Astronomical Union, Symposium no. 156. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Cazenave A., Le Cozannet G. (2014): Sea level rise and coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15–34. DOI: 10.1002/2013EF000188.
- DGFI-TUM (2018): Open Altimeter Data Base (OpenADB). [https://openadb.dgfi.tum.de/en/mean\\_sea\\_level](https://openadb.dgfi.tum.de/en/mean_sea_level).
- Dixon T. (2017): Curbing Catastrophe: Natural Hazards and Risk Reduction in the Modern World. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781139547345.
- Douch K., Schubert C., Wu H., Müller J., Pereira Dos Santos F. (2018): Simulation-based evaluation of a cold atom interferometry gradiometer concept for gravity field recovery. *Advances in Space Research*, 61(5), 1307–1323. DOI: 10.1016/j.asr.2017.12.005.
- Drewes H., Kuglitsch F.G., Adám J., Rózsa S. (2016): The Geodesist's Handbook 2016. *Journal of Geodesy*, 90(10), 907–1205. DOI: 10.1007/s00190-016-0948-z.
- Dvorak J., Dzurisin D. (1997): Volcano Geodesy: the search for magma reservoirs and the formation of eruptive events. *Reviews in Geophysics*, 35(3), 343–384.
- Erdogan E., Schmidt M., Seitz F., Durmaz M. (2017): Near real-time estimation of ionosphere vertical total electron content from GNSS satellites using B-splines in a Kalman filter. *Annales Geophysicae*, 35(2), 263–277. DOI: 10.5194/angeo-35-263-2017.
- Farinotti D., Longuevergne L., Moholdt G., Duethmann D., Mölg T., Bolch T., Vorogushyn S., Güntner A. (2015): Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. *Nature Geoscience*, 8, 716–722.
- Fasullo J., Lawrence D., Swenson S. (2016): Are GRACE-era terrestrial water trends driven by anthropogenic climate change? *Advances in Meteorology*, Article ID 4830603.
- Flury J. (2017): Neue Sensorik für die Schwerefeldbestimmung und relativistische Geodäsie. In: *Erdmessung und Satellitengeodäsie, Handbuch der Geodäsie*, hrsg. v. R. Rummel und W. Freeden, 349–400. DOI: 10.1007/978-3-662-47100-5\_11.
- Groh A., Ewert H., Scheinert M., Fritsche M., Rülke A., Richter A., Rosenau R., Dietrich R. (2012): An Investigation of the Glacial Isostatic Adjustment over the Amundsen Sea Sector, West Antarctica. *Global and Planetary Change*. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.08.001.
- IAG (2016): Description of the Global Geodetic Reference Frame Position paper adopted by the IAG Executive Committee, April 2016. [https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF\\_description\\_by\\_the\\_IAG\\_V2.pdf](https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF_description_by_the_IAG_V2.pdf).
- IAG (2018): [www.iag-aig.org](http://www.iag-aig.org).
- Ihde J., Sánchez L., Barzaghi R., Drewes H., Foerste Ch., Gruber T., Liebsch G., Marti U., Pail R., Sideris M. (2017): Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRS). *Surveys in Geophysics*, 38(3), 549–570. DOI: 10.1007/s10712-017-9409-3.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kaula W.M. (1969): The Terrestrial Environment: Solid Earth and Ocean Physics. Report of a Study at Williamstown, Massachusetts, sponsored by NASA Electronics Research Center and MIT Measurement Systems Laboratory.
- Kumar S., and 15 authors (2016): Assimilation of Gridded GRACE Terrestrial Water Storage Estimates in the North American Land Data Assimilation System. *J. Hydrometeorology*, 17(7).
- Kusche J., Eicker A., Forootan E., Springer A., Longuevergne L. (2016): Mapping probabilities of extreme continental water storage changes from space gravimetry. *Geophys. Res. Lett.* 43(15), 8026–8034.
- Kusche J., Klemann V., Sneeuw N. (2014): Mass Distribution and Mass Transport in the Earth System: Recent Scientific Progress Due to Interdisciplinary Research. *Surveys in Geophysics*, 35(6), 1243–1249.
- Kwak Y., Bloßfeld M., Schmid R., Angermann D., Gerstl M., Seitz M. (2018): Consistent realization of celestial and terrestrial reference frames. *Journal of Geodesy*. DOI: 10.1007/s00190-018-1130-6.
- Legeais J.-F., Ablain M., Zawadzki L., Zuo H., Johannessen J.A., Scharffenberg M.G., Fenoglio-Marc L., Fernandes M.J., Andersen O.B., Rudenko S., Cipollini P., Quartly G.D., Passaro M., Cazenave A., Benveniste J. (2018): An improved and homogeneous altimeter sea level record from the ESA Climate Change Initiative. *Earth System Science Data*, 10(1), 281–301. DOI: 10.5194/essd-10-281-2018.
- Müller J. (2017): Erdmessung mit Quanten und Relativität. *BWG Jahrbuch 2016*. J. Cramer Verlag, Braunschweig, 238–251. <http://publikationsserver.tu-braunschweig.de/get/64982>.
- Müller J., Dirkx D., Kopeikin S., Lion G., Panet I., Petit G., Visser P. (2018): High Performance Clocks and Gravity Field Determination. ISSI book on High Performance Clocks, *Space Science Reviews* 214:5. DOI: 10.1007/s11214-017-0431-z.
- Neumeyer J., Barthelmes F., Krone C., Petrovic S., Schmidt R., Virtanen H., Wilmes H. (2008): Analysis of gravity field variations derived from Superconducting Gravimeter recordings, the GRACE satellite and hydrological models at selected European sites. *Earth, Planets and Space*. DOI: 10.1186/BF03352817.
- Nothnagel A., Angermann D., Börger K., Dietrich R., Drewes H., Görres B., Hugentobler U., Ihde J., Müller J., Oberst J., Pätzold M., Richter B., Rothacher M., Schreiber U., Schuh H., Soffel M. (2010): Space-Time Reference Systems for Monitoring Global Change and for Precise Navigation. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Band 44, Frankfurt/Main.
- Pail R., Bingham R., Braitenberg C., Dobslaw H., Eicker A., Güntner A., Horwath M., Ivins E., Longuevergne L., Panet I., Wouters B. (2015): Science and User Needs for Observing Global Mass Transport to Understand Global Change and to Benefit Society; *Surveys in Geophysics*, 36(6), 743–772, Springer Netherlands. DOI: 10.1007/s10712-015-9348-9.

- Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., Förste C., Goiginger H., Schuh W.D., Höck E., Reguzzoni M., Brockmann J.M., Abrikosov O., Veicherts M., Fecher T., Mayrhofer R., Krasbutter I., Sansó F., Tscherning C.C. (2011): First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy*, 85(11), 819–843. DOI: 10.1007/s00190-011-0467-x.
- Pail R., Fecher T., Barnes D., Factor J.F., Holmes S.A., Gruber T., Zingerle P. (2018): Short note: the experimental geopotential model XGM2016. *Journal of Geodesy*, 92(4), 443–451. DOI: 10.1007/s00190-017-1070-6.
- Pfurtscheller C., Thieken A.H. (2013): The price of safety: costs for mitigating and coping with Alpine hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2619–2637.
- Plag H.-P., Pearlman M. (eds.) 2009: The Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Springer, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-642-02687-4\_3.
- Rietbroek R., Brunnabend S.-E., Kusche J., Schröder J., Dahle C. (2016): Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 113(6), 1504–1509.
- Sánchez L., Drewes H. (2016): Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. *Journal of Geodynamics*, 102, 1–23. DOI: 10.1016/j.jog.2016.06.005.
- Sasgen I., Martín-Español A., Horvath A., Klemann V., Petrie E.J., Wouters B., Horwath M., Paio R., Bamber J.L., Clarke P.J., Konrad H., Drinkwater M.R. (2017): Joint inversion estimate of regional glacial isostatic adjustment in Antarctica considering a lateral varying Earth structure (ESA STSE Project REGINA). *Geophysical Journal International*, 211(3), 1534–1553. DOI: 10.1093/gji/ggx368.
- Scanlon B.R., Zhang Z., Save H., Sun A.Y., Müller-Schmid H., van Beek L.P.H., Wiese D.N., Wada Y., Di Long, Reedy R.C., Longuevergne L., Döll P., Bierkens M.F. P. (2018): Proceedings of the National Academy of Sciences, Jan 2018, 201704665. DOI: 10.1073/pnas.1704665115.
- Scheinert M., Ferraccioli F., Schwabe J., Bell R., Studinger M., Damaske D., Jokat W., Aleshkova N., Jordan T., Leitchenkov G., Blankenship D.D., Damiani T.M., Young D., Cochran J.R., Richter T.D. (2016): New Antarctic Gravity Anomaly Grid for Enhanced Geodetic and Geophysical Studies in Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 1944–8007. DOI: 10.1002/2015GL067439.
- Schreiber U., Kodet J. (2018): The Application of Coherent Local Time for Optical Time Transfer and the Quantification of Systematic Errors in Satellite Laser Ranging. *Space Science Reviews*, 214: 22. DOI: 10.1007/s11214-017-0457-2.
- Schuh H., Wickert J., Sips M., Schöne T., Rogäß C., Roessner S., König R., Klemann V., Heinkelmann R., Dobslaw H., Beyerle G. (2016): Zukunft der globalen Geodäsie und Fernerkundung aus Sicht des Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam. In: Erdmessung und Satellitengeodäsie, Handbuch der Geodäsie, hrsg. v. R. Rummel und W. Freeden, Springer, 443–497. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2\_16-1.
- Schumacher M., Forootan E., van Dijk A., Müller-Schmid H., Crosbie R., Kusche J., Döll P. (subm.): Improving drought simulations within the Murray-Darling Basin by combined calibration/assimilation of GRACE data into the WaterGAP Global Hydrology Model. *Remote Sensing of Environment*, 204, 212–228.
- Schwatke C., Dettmering D., Bosch W., Seitz F. (2015): DAHITI – an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(10), 4345–4364. DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015.
- Seitz M., Angermann D., Bloßfeld M. (2016): Geometrische Referenzsysteme. In: Erdmessung und Satellitengeodäsie, Handbuch der Geodäsie, hrsg. v. R. Rummel und W. Freeden, Springer, 443–497.
- Shepherd A., Ivins E., Rignot E., Smith B., van den Broeke M., Velicogna I., ..., Groh A., ..., Helm V., ..., Horvath A., ..., Horwath M., ..., Rietbroek R., ..., Sasgen I., ..., Schröder L., Vishwakarma B.D., et al. (2018): Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 556, 219–222.
- Shepherd A., Ivins E.R., Geruo A., Barletta V.R., Bentley M.J., Bettadpur S., Briggs K.H., Bromwich D.H., Forsberg R., Galin N., Horwath M., Jacobs S., Joughin I., King M.A., Lenaerts J.T.M., Li J., Ligtenberg S.R.M., Luckman A., Luthcke S.B., McMillan M., Meister R., Milne G., Mouginot J., Muir A., Nicolas J.P., Paden J., Payne A.J., Pritchard H., Rignot E., Rott H., Sørensen L.S., Scambos T.A., Scheuchl B., Schrama E.J.O., Smith B., Sundal A.V., van Angelen J.H., van De Berg W.J., van den Broeke M.R., Vaughan D.G., Velicogna I., Wahr J., Whitehouse P.L., Wingham D.J., Yi D., Young D., Zwally H.J. (2012): A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 338 (6111), 1183–1189.
- Sneeuw N., Lorenz C., Devaraju B., Tourian M.J., Riegger J., Kunstmann H., Bárdossy A. (2014): Estimating Runoff Using Hydro-Geodetic Approaches. *Surveys in Geophysics*, 35(6), 1333–1359. DOI: 10.1007/s10712-014-9300-4.
- Tourian M.J., Schwatke C., Sneeuw N. (2017): River discharge estimation at daily resolution from satellite altimetry over an entire river basin. *Journal of Hydrology*, 546, 230–247. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.009.
- UN, United Nations, Committee of Experts on Global Geospatial Information Management Report on the sixth session (2016): Committee of Experts on Global Geospatial, Supplement No. 26, E/2016/46-E/C.20/2016/15.
- UN, United Nations, General Assembly (2015): Sixty-ninth session, Agenda item 9, Report of the Economic and Social Council, A/69/L.53.
- Vishwakarma B.D., Horwath M., Devaraju B., Groh A., Sneeuw N. (2017): A Data-Driven Approach for Repairing the Hydrological Catchment Signal Damage Due to Filtering of GRACE Products. *Water Resources Research*, 53(11), 9824–9844. DOI: 10.1002/2017WR021150.
- WCRP Global Sea Level Budget Group (2018): Global Sea Level Budget 1993–Present, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* DOI: 10.5194/essd-2018-53.
- Wilmes H., Vitushkin L., Palinkas V., Falk R., Wziontek H., Bonvalot S. (2016): Towards the definition and realization of a Global Absolute Gravity Reference System. In: Freymueller J.T., Sánchez L. (eds) International Symposia on Earth and Environmental Sciences for Future Generations. International Association of Geodesy Symposia, 147, Springer.
- Wouters B., Bonin J., Chambers D., Riva R., Sasgen I., Wahr J. (2014): GRACE, time-varying gravity, Earth system dynamics and climate change. *Rep. Prog. Phys.* 77, 116801 (41pp).
- Wu X., Kusche J., Landerer F. (2017): A new unified approach to determine geocentre motion using space geodetic and GRACE gravity data. *Geophysical Journal International*, 209(3), 1398–1402.
- Zuo H., Balmaseda M., Mogensen K. (2017): The new eddy-permitting ORAP5 ocean reanalysis: description, evaluation and uncertainties in climate signals. *Climate Dynamics*, 49(3), 791–811.

#### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller  
Leibniz Universität Hannover, Institut für Erdmessung  
Schneiderberg 50, 30167 Hannover  
mueller@ifc.uni-hannover.de

Prof. Dr. techn. Mag. Roland Pail  
Technische Universität München, Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie  
Arcisstraße 21, 80333 München  
roland.pail@tum.de

DGK-Abteilung Erdmessung  
[www.dgk.badw.de/struktur/abteilung-erdmessung.html](http://www.dgk.badw.de/struktur/abteilung-erdmessung.html)

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter [www.geodaeisie.info](http://www.geodaeisie.info).