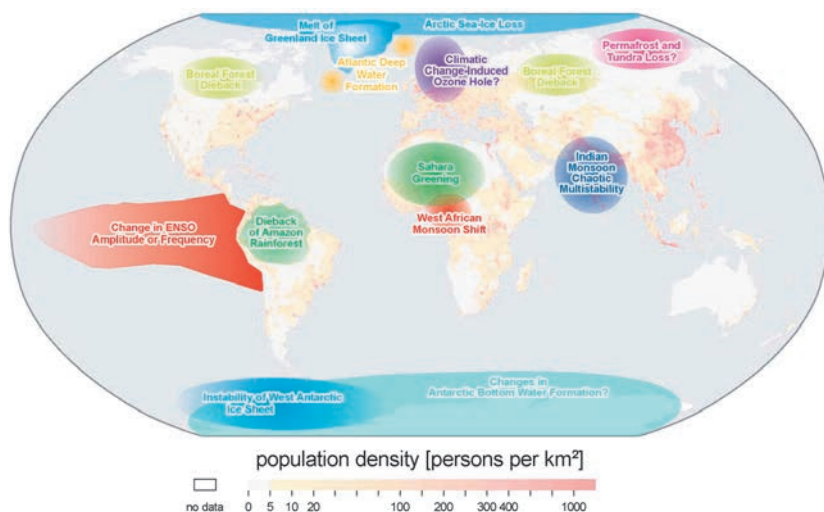


# Die Vermessung der Welt aus dem All

Die Satellitengeodäsie spielt als messende Ingenieursdisziplin eine bedeutende Rolle in der Erdsystem- und Klimaforschung. Der geodätische Blick aus dem All ist global und synoptisch, eine Bedingung um das Gesamtsystem „Erde“ quantitativ erfassen und verstehen zu können. Wie verschiedene Komponenten des globalen Wasserkreislaufs quantifiziert werden, wird anhand zweier Satellitenverfahren erläutert.



01

*Tipping Points: kritische Indikatoren der Klimastabilität.*

## 1. Geodäsie und die Vermessung der Welt

Vom österreichisch-deutschen Schriftsteller Daniel Kehlmann erschien 2005 der Bestseller *Die Vermessung der Welt*, ein Roman über die Geodäten Carl Friedrich Gauß (1777–1855) und Alexander von Humboldt (1769–1859). Der breiteren Öffentlichkeit sind die beiden Herren zwar eher als Mathematiker bzw. Naturforscher bekannt. Der Buchtitel verweist aber auf die Kernaufgabe der Geodäsie, nämlich das Ausmessen und Abbilden der Erdoberfläche. Und genau das taten die Herren Gauß und von Humboldt. Nicht umsonst zeigte der alte Zehnmarkschein ein norddeutsches Triangulationsnetz samt Sextant; sie sym-

bolisierten die Vermessungstätigkeiten von Gauß. Seine mathematischen Entwicklungen wurden oft aus seinen praktischen Messtätigkeiten gespeist; zum Beispiel die Schätzmethode der kleinsten Quadrate oder seine Statistik. Letzteres ist auch auf dem alten Zehnerschein symbolisiert, nämlich durch die Gauß'sche Normalverteilung. Auch Alexander von Humboldt war ein aktiver Geodät, hatte er auf seinen Entdeckungsreisen doch immer *high-tech* Vermessungsgeräte dabei.

Geodäten haben schon immer davon geträumt, die Erde als Ganzes vermessen zu können. Der Grundstein dazu wurde vor 150 Jahren vom preußischen General Johann Jacob Baeyer gelegt, als er Delegierte aus Preußen, Österreich und Sachsen 1862 nach Berlin zur Diskussion seiner „Entwurf zu einer Mitteleuropäischen Gradmessung“ einlud. Bald schlossen sich weitere europäische Staaten der Initiative an, was als Geburtsstunde der Internationalen Assoziation der Geodäsie (IAG) gilt. Im Jahr 2013 veranstaltete die IAG in Potsdam zu Ehren von General Baeyer eine große internationale Konferenz.

Der Traum der globalen Vermessung der Erde wurde natürlich erst im Satellitenzeitalter realisiert. Nur von Satelliten aus besteht überhaupt die Chance, die Erde gleichmäßig, mit homogener Genauigkeit und in einem beschränkten Zeitraum zu vermessen. Schon aus den ersten Sputnik-Bahnbeobachtungen konnte die Erdabplattung genauer bestimmt werden, als aus allen terrestrischen Messungen der

Jahrhunderte davor. Danach entwickelte sich die Satellitengeodäsie in einem rasanten Tempo. Man denke nur an die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Möglichkeiten, die globale satellitengestützte Navigationssysteme wie das US-amerikanische GPS oder das künftige europäische Galileo bieten.

Die Notwendigkeit kontinuierlicher Erdbeobachtung wird durch die aktuelle Debatte um den globalen Wandel unterstrichen. Man liest zwar regelmäßig in der Zeitung, dass der Meeresspiegel ansteigt. Wie misst man aber zuverlässig solche kleinen Änderungen (etwa 3 mm/Jahr), wenn man überlegt, dass Wellen und Gezeiten um einige Größenordnungen größer sind? Und wo kommt das Wasser her? Teils erklärt sich der Meeresspiegelanstieg durch thermische Ausdehnung: wenn die mittleren Temperaturen steigen, dehnt sich auch das Wasservolumen aus. Zum Großteil erklärt sich der Meeresspiegelanstieg aber durch eine großskalige Verlagerung der Wasser- und Eismassen im globalen Wasserkreislauf.

In der Debatte um den Klimawandel haben Kollegen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) den Begriff der „tipping points“ geprägt. Dies sind kritische Indikatoren des Klimasystems insgesamt. Zum Beispiel beobachten geodätische Satelliten seit einigen Jahren eine beschleunigte Abschmelzung des Grönländischen Eisschildes. Ohnehin spielt die Satellitengeodäsie bei etwa der Hälfte der „tipping points“, siehe (01), eine wichtige Beobachtungsrolle.

Dieser Beitrag dient dazu, anhand von zwei unterschiedlichen geodätischen Satellitensystemen die zentrale Rolle der Geodäsie in der Erdbeobachtung zu verdeutlichen.

## 2. Satellitengravimetrie

Wie „wiegt“ man nun großskalige Massenänderungen wie das Abschmelzverhalten von Grönland aus dem All? Großräumige Massenumlagerungen bewirken eine Änderung des Erdschwerefeldes. Das Schwerefeld der Erde bringt ja „nur“ die Gesamtmasseverteilung in und auf der Erde zum Ausdruck. Auch wenn es sich hier um vielleicht die 6. Nachkommastelle handelt, sind solche zeitliche Änderungen messbar. Eine direkte Schwerefeldmessung vom Satelliten aus wird aber nicht gelingen. Satelliten bewegen sich im Freifall, genau wie ein

Astronaut auf der Raumstation schwebt und anscheinend nicht von der Erde angezogen wird. (In Wahrheit wird er von der Erde angezogen; nur ist die Erdanziehung in Bilanz mit der Zentrifugalbeschleunigung durch die Freifallbewegung.) Was sich aber sehr wohl messen lässt, ist die unterschiedliche Fallbewegung zweier Satelliten. Beide Satelliten befinden sich an unterschiedlicher Position im Erdschwerefeld und werden entsprechend unterschiedlich angezogen. Deren Fallbewegung und somit die Internatellitendistanz ist daher variabel.

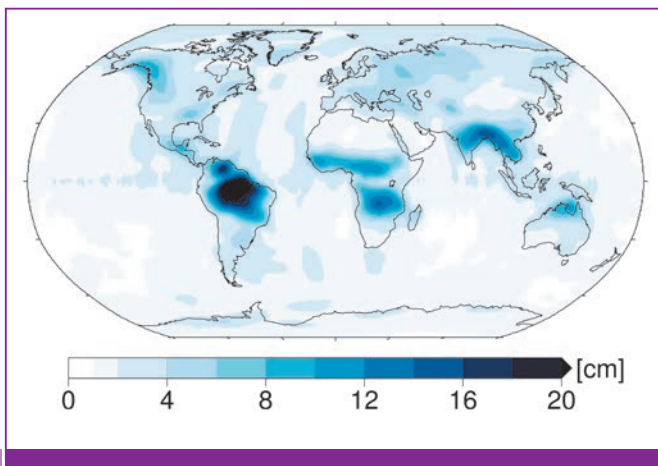
Dieses Prinzip, das sich „low-low satellite-to-satellite tracking“ nennt, wird von der amerikanisch-deutschen Satellitenmission GRACE realisiert. Dabei befinden sich seit etwa zehn Jahren zwei baugleiche Satelliten auf derselben polaren Umlaufbahn in etwa 450 Kilometer Höhe. Allerdings sind sie in der Bahn um etwa 200 Kilometer versetzt; der eine Satellit jagt dem anderen mit fast 30 Sekunden Verzögerung hinterher. Die Entfernungsänderungen zwischen den beiden Satelliten werden mit einer Präzision von etwa zehn Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ) durch K-Band-Entfernungsmessung erfasst.

Aus diesen hochgenauen Messungen produzieren Geodäten praktisch jeden Monat ein Erdschwerefeld. Im Rahmen der Klimaforschung werden solche Ergebnisse erst interessant, wenn die monatlichen Schwerefelder so-zu-sagen als Film hintereinander gereiht werden. Es entsteht eine Zeitfolge von Schwerefeldänderungen, also von Massenverlagerungen im Erdsystem, über die letzten 10 Jahre. Bedingt durch die Höhe der Satelliten und durch die, trotz Messgenauigkeit, relativ geringe Sensitivität kann die Satellitengravimetrie allerdings solche Änderungen nur für räumliche Skalen auflösen, die größer als etwa 400 Kilometer sind. Trotzdem liefert die Zeitreihe der Massenänderungen ein umfassendes Bild der Erde, das Hydrologen, Eiswissenschaftler oder Geophysiker so noch nicht gesehen hatten. Über die klassischen bildgebenden Verfahren der Satellitenfernerkundung hinaus, eröffnet die Satellitengravimetrie eine komplett neue Art, die Erde zu erkunden. Statt elektro-magnetischer Wellen wird die gravitationelle Wechselwirkung genutzt.

Weil viele, obwohl nicht alle, Massenverlagerungen im Erdsystem mit dem Wasserkreislauf zusammen hängen, werden die

## SUMMARY

*Satellite geodesy plays a key role in Earth system science and climate research as it provides a quantitative observational basis. The geodetic vantage point from space is global and synoptic, which is required to determine “system Earth” in a quantitative sense and to understand it. Two satellite geodetic methods are employed here to demonstrate how individual components of the global water cycle are measured. Satellite gravimetry measures changes in the Earth’s gravity field, from which large scale mass transports are inferred. Thus several processes like ice cap melting in Greenland and West Antarctica, melting of continental glaciers, large scale groundwater depletion and, ultimately, sea level rise from continental freshwater influx into the oceans can be monitored. Satellite altimetry, on the other hand, is a geometric measurement method. It also allows the long term monitoring of sea level and sea level rise. The geometric sea surface change, however, is a combination of freshwater influx and thermal expansion. Hence, the combination of both satellite geodetic methods allows disentangling the different contributors. Satellite altimetry is also used for hydrological purposes here, monitoring inland water bodies. This is a relevant application of satellite altimetry as the global database of lake and river heights and river runoff from lake and river gauges is far from satisfactory for continental scale modelling. Moreover, the database has been in decline over the past years. Apart from the focus on the quantitative role of satellite geodesy this contribution emphasizes the need for long-term observation of key variables in the Earth system.*



02

Jahresgang der hydrologischen Massenänderungen, ausgedrückt in äquivalenter Wasserhöhe in Zentimeter.

Massen oft als Wasserschicht ausgedrückt: die sogenannte wasseräquivalente Höhe. Dies ist selbstverständlich irreführend für Massenänderungen, die nicht mit Hydrologie zu tun haben. Auch

wenn es um hydrologische Massenverlagerungen geht, können wasseräquivalente Höhen in die Irre führen. Das Gravitationssignal aus der GRACE-Mission kann nicht unterscheiden, ob es nun um Oberflächenwasser, Bodenfeuchte, tiefes Grundwasser oder gar um Wasser in der Biosphäre geht. Eine vertikale Trennung ist nicht möglich. Der Vorteil ist aber, dass man ein vergleichbares Maß und einen globalen Überblick erhält, was in (02) und (03) eindrucksvoll belegt wird.

(02) zeigt die Variabilität der äquivalenten Wasserhöhe weltweit. Obwohl weitere Perioden im Spiel sind, geht es hier in erster Linie um den Jahresgang. Für jeden Pixel auf dieser Karte muss man sich also eine jährliche Sinuskurve mit einer Amplitude vorstellen, die man von der jeweiligen Farbe abliest. Konkret geht zum Beispiel der Wasserspeicher des Amazonasbeckens jährlich mit 20 Zentimetern Amplitude auf und ab. Man sieht auch, dass der Amazonas vom Orinocobecken getrennt ist. Weitere Gebiete mit starker hydrologischer Aktivität sind die Tropenbereiche in Afrika und Nordaustralien und der Zusammenfluss von Ganges und Brahmaputra. Auch die hydrologisch eher inaktiven Kontinentalgebiete, wie die Wüsten und die Antarktis fallen durch helle Farben ins Auge. Die Karte zeigt gleichzeitig auch die Beschränkungen der momentanen Satellitengravimetrie auf. Für viele Gebiete, wie etwa die indonesischen Inseln, reicht die räumliche Auflösung nicht aus.

Selbstverständlich ist es keine neue Erkenntnis, dass im Wüstenbereich hydrologisch wenig passiert und dass die Tropen dagegen sehr aktiv sind. Die Innovation der Satellitengravimetrie steckt in der Tatsache,

dass sich Massenumsätze messtechnisch quantifizieren lassen und zwar global mit homogener Genauigkeit und homogener (obwohl grober) räumlicher Auflösung. Dies ist umso wichtiger, weil das terrestrische Netzwerk von hydrologischen und meteorologischen Messstationen seit Jahren rückläufig ist. Der langfristige Betrieb zum Beispiel von Flusspegelstationen ist nun mal für viele Länder weltweit eine kostspielige Angelegenheit.

In Gegensatz zur jährlichen Variation stellt (03) die langfristige Änderung, ausgedrückt in cm/Jahr Änderung der äquivalenten Wasserhöhe, dar. Es sei nochmals betont, dass die äquivalente Wasserhöhe nur eine Darstellung der gemessenen Massenänderungen ist. Zum Beispiel haben die blauen Bereiche in Skandinavien und Nordamerika wenig mit langjährigen Grundwasseränderungen zu tun. Vielmehr geht es um postglaziale Hebung der Landmassen nach dem Rückzug der Eisschilde der letzten Eiszeit (vor 18.000 Jahren). Die Massen der damaligen kilometerdicken Eispanser haben die Erdkruste nach innen deformiert. Seitdem das Eis abgeschmolzen ist, bewegt sich die Erdkruste wieder visko-elastisch zurück. Es geht um Bewegungsraten bis zu einem Zentimeter pro Jahr, die übrigens auch mit anderen geodätischen Messtechniken wie GPS oder aus geologischen Analysen festgestellt wurden. Die Quantifizierung der Massenbewegungen und eine Bestimmung der räumlichen Ausdehnung über Kanada sind aber wichtige Errungenschaften der GRACE-Mission.

Das Beunruhigende an (03) sind die roten Bereiche über Grönland und der Westantarktis. Die Satellitengravimetrie erlaubt eine eindeutige Quantifizierung des Abschmelzverhaltens, etwas das mit herkömmlichen Fernerkundungsmethoden oder mit Modellierung kaum möglich war. Vom grönländischen Eisschild schmelzen etwa 300 Gt/Jahr (Gigatonnen pro Jahr) ab. Zum Vergleich: eine Gigatonne entspricht der Wassermasse in einem Würfel mit einem Kilometer Kantenlänge. Wenn 300 solcher Eiswürfel pro Jahr abschmelzen, bewirkt das einen mittleren Meeresspiegelanstieg von etwa 0,85 Millimeter pro Jahr. Zahlenmäßig mag das vielleicht gering erscheinen. Über den Zeitraum der GRACE-Satellitenmission aber sind die Ozeane im Schnitt alleine wegen Grönland um fast einen Zentimeter ge-

stiegen. GRACE hat auch Hinweise darauf geliefert, dass sich der Abschmelzvorgang beschleunigt. Wichtig in der Meeresspiegeldiskussion ist auch die Tatsache, dass der so berechnete Meeresspiegelanstieg nur einen Schnittwert über die ganze Ozeanfläche darstellt. In Wirklichkeit wird aber das Schmelzwasser nicht gleichmäßig über die Ozeane verteilt. Eine große Masse wie das grönländische Eisschild entfaltet nämlich gravitationelle Wirkung. Wenn das Eis schmilzt, verliert es die Wirkung und wird das Wasser im umliegenden Meer in geringerem Maße anziehen. Der Meeresspiegel des umliegenden Meeres wird sich dadurch sogar senken. Das Abschmelzen von Grönland muss sich also auf Europa nicht negativ auswirken, wenigstens nicht was den Meeresspiegelanstieg betrifft.

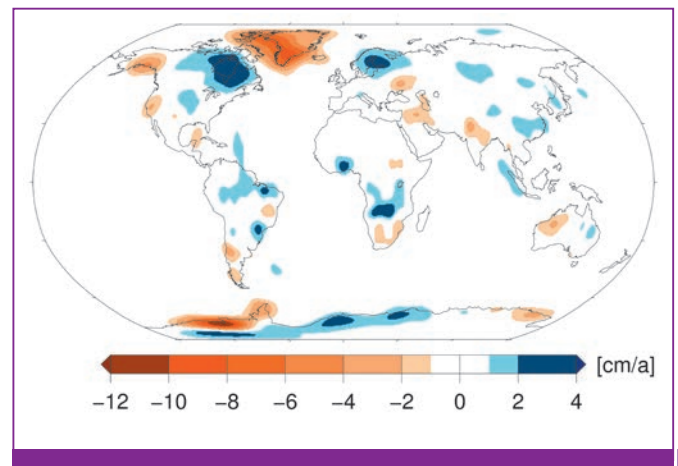
Die antarktischen Eismassen dagegen sind bedrohlicher für die nördliche Halbkugel. Die roten Bereiche in der Westantarktis in (03) zeigen eindeutig, dass die Antarktische Eis verliert. Der Umfang beträgt in etwa 180 Gt/Jahr, was einem mittleren Meeresspiegelanstieg von 0,5 Millimetern pro Jahr entspricht. (01) nennt das westantarktische Eisschild als einen der „tipping points“. Dementsprechend ist eine genaue langfristige Beobachtung hochrelevant.

Auch kontinentales Eisabschmelzverhalten ist in (03) klar erkennbar. Insbesondere die Gletscher von Alaska und Patagonien verlieren an Masse. Verglichen mit Grönland und der Westantarktis fällt dies vielleicht weniger „ins Gewicht“. Das Abschmelzen ist aber ein klares Indiz für den globalen Wandel.

Des Weiteren beschreibt die Karte auch langfristige Speicheränderungen gewisser Flussbecken. Der Amazonas scheint schwerer, also nasser, zu werden, genauso wie der Sambesi. Die roten Flecken in Kalifornien (central valley), im mittleren Osten und in Nordindien (Ganges-Ebene) deuten klar auf Grundwasserentnahme für Bewässerungszwecke hin. Wenn das Wasser mal abgepumpt ist, verdunstet es schnell und landet in den globalen Wasserkreislauf.

Interessant ist auch die Änderung des Schwerefeldes durch das Sumatra-Andaman Erdbeben, Dezember 2004. Selbstverständlich geht es hier nicht um einen langsamen Bewegungsvorgang, die man in Zentimeter pro Jahr ausdrücken sollte, sondern um eine ruckartige Änderung des

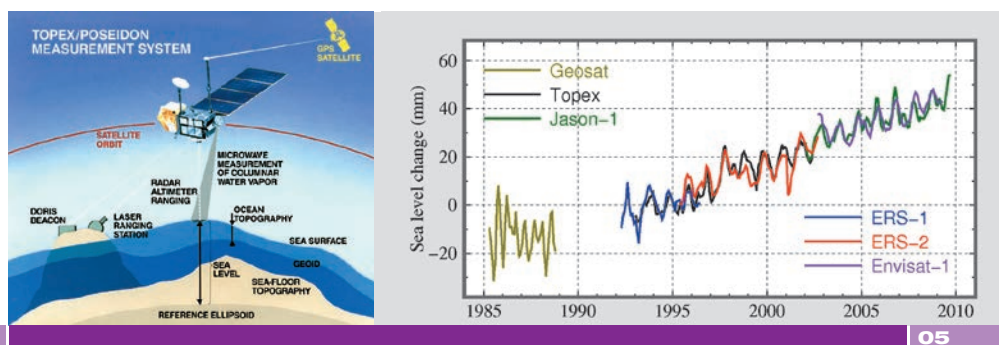
Schwerefeldes. Ob der Stärke der Massenänderung hat sich dieser Sprung in die Karte eingeschlichen. Es zeigt auf jeden Fall, dass die GRACE-basierten Schwerefeldänderungen nicht nur Objekt der hydrologischen Forschung und Eisforschung ist, sondern auch der Geophysik.



Langfristige Massenänderungen an der Erdoberfläche, ausgedrückt in Änderungen der äquivalenten Wasserhöhe in cm/Jahr.

### 3. Satellitenaltimetrie

Die Satellitengravimetrie erfasst die Massenverteilung und -umverteilung im Erdsystem. Dagegen erfasst die Satellitenaltimetrie die Erde in geometrischem Sinne. Das Messprinzip ist einfach, siehe (04). Der Satellit sendet einen Radarpuls nach unten und empfängt ihn nach Reflektion an der Meeresoberfläche. Die Laufzeitmessung ergibt also, nach Multiplikation mit der Lichtgeschwindigkeit und nach atmosphärischer Korrektur, die doppelte Entfernung zwischen Satellit und Meeresoberfläche. Wenn man die Satellitenbahn genau kennt, zum Beispiel aus GPS-Messung, hat man somit die Höhe der Meeresoberfläche bestimmt. So wird ein Profil der Erde direkt unterhalb der Satellitenbahn abgestreift, die sogenannte Bodenspur. Der Reflektionspunkt an der Meeresoberfläche hat durch die Ausweitung des Radarstrahls übrigens einen Durchmesser in der Größenordnung von etlichen Kilometern. Seit nunmehr drei Jahrzehnten kommt die Satellitenaltimetrie zum Einsatz, obwohl erst ab Anfang der 90er Jahre operationell. Eine amerikanisch-französische Zusammenarbeit hat eine Generation von Altimetermissionen hervorgebracht mit Namen wie Topex/Poseidon und Jason. Die Europäische Raumfahrtbehörde ESA Satelliten wie ERS und Envisat. Die Relevanz kontinuierlicher Ozeanbeobachtung wurde gemeinsam von der ESA und der Europäischen Union anerkannt. Im Rahmen des europäischen Erdbeobachtungspro-



04

05

Messprinzip der Satellitenaltimetrie.

(05) Verlauf des mittleren Meeresspiegels in mm.

gramms „Global Monitoring for Environment and Security“ (GMES) wird bald der Envisat-Nachfolger unter dem Namen Sentinel-3 ins All starten.

Die Satellitenaltimetrie wurde in erster Linie zur Beobachtung der Meeresoberfläche entworfen. In der Ozeanografie hat sie daher auch große Erfolge vorzuweisen: Gezeitenmodelle konnten mit hoher Genauigkeit verfeinert werden, die globale Ozeanzirkulation und deren Änderungen werden kontinuierlich verfolgt, kleinräumigere Strukturen wie Eddies (Wirbel) oder Tsunamis werden erfasst, das El-Niño Phänomen konnte genauer erforscht werden, und so weiter.

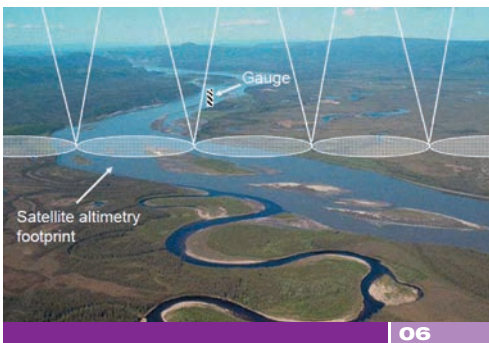
In der Klimaforschung ist der Meeresspiegelanstieg eine besonders wichtige Größe. Die Satellitenaltimetrie erlaubt ein langfristiges Monitoring der Meeresoberflächen mit hoher Genauigkeit und homogener räumlicher Abdeckung. Nur so können zuverlässig Schätzungen des Anstiegs ermittelt werden und in den Berichten des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) eine tragende Rolle spielen. In (05) wird die mittlere Meeresoberfläche ab Anfang der 90er Jahr durch Multimissionsanalyse verfolgt. Der mittlere Anstieg beträgt  $3.1 \pm 0.7$  mm/Jahr. Wie im Abschnitt zur Satellitengravimetrie, muss auch hier bemerkt werden, dass diese Zahl einen Mittelwert über die gesamte Ozeanoberfläche darstellt. Von Ort zu Ort variiert der Anstieg; er kann durchaus Werte annehmen, die eine Größenordnung größer sind, also im Bereich einiger Zentimeter pro Jahr. Auch gibt es weite Ozeanbereiche, wo der Meeresspiegel nicht steigt sondern fällt.

Klar erkennbar in (05) ist auch die Überlagerung von generellem Anstieg und Jahresgang. Zusätzlich sind noch sogenannte interannuelle Effekte, wie z.B. das schon erwähnte El-Niño Phänomen, zu sehen.

Die verschiedenen Altimetersatelliten geben, trotz Differenzen, ein konsistentes Bild. Die Differenzen erklären sich aus Unterschieden in Satellitenbahn, Bodenspurmuster, Abtastverhalten, Bauweise und Radarfrequenz.

Richtig interessant wird die Satellitengeodäsie erst in der Kombination aus gravimetrischem und geometrischem Verfahren. Im vorigen Abschnitt wurde festgestellt wie viel Eis in Grönland, der West-Antarktis und den großen kontinentalen Gletschergebieten ins Meer verschwindet. Zusätzlich wurde die Massenänderung einiger großer Flussbecken festgestellt, sowohl mit positivem als auch negativem Vorzeichen. Eine konsistente Zählung ergibt einen Beitrag des kontinentalen Abflusses (Wasser und Eis) in Höhe von  $1.2 \pm 0.4$  mm/Jahr. Die Differenz zum obengenannten altimetrisch bestimmten Meeresspiegelanstieg von 3.1 mm/Jahr beträgt 1.6 mm/Jahr. Diese Differenz, die also erst aus der gemeinsamen Analyse von GRACE und Altimetrie bestimmt werden kann, stellt die thermische Ausdehnung der Ozeane dar, die sogenannte sterische Komponente des Meeresspiegelanstiegs. Sie wird hier ausschließlich aus satellitengeodätischen Verfahren bestimmt, ohne Zuhilfenahme von ozeanografischer Modellierung oder klimatischen Annahmen. Solche unabhängigen Messungen sind eine wichtige Stütze für die weitreichenden Stellungnahmen in den IPCC-Berichten.

Wie vorher beschrieben ist die Satellitenaltimetrie für den Gebrauch auf dem offenen Ozean gedacht; in Küstennähe liefert sie deutlich schlechtere Ergebnisse. Trotzdem versucht man seit einigen Jahren, auch größere Binnenseen, Speicherseen und sogar breite Flüsse zu beobachten. Obwohl der globale Wasserkreislauf einen der wichtigsten Prozesse im System Erde darstellt, ist er messtechnisch relativ schlecht

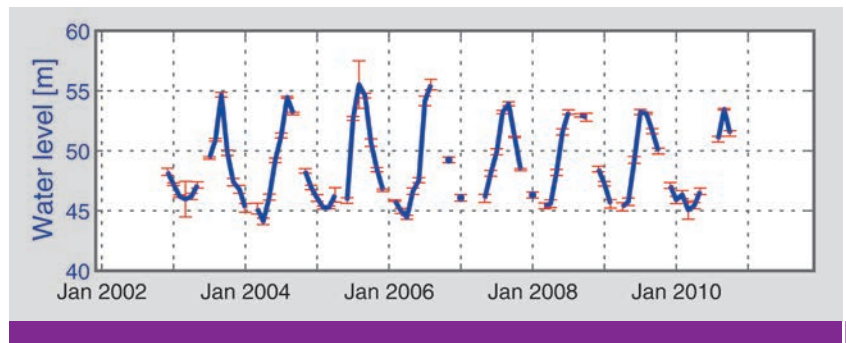


erfasst. Die Abflüsse aus den großen Flusssystemen weltweit werden hauptsächlich an terrestrischen Pegelmessstationen gemessen. Solche Messungen werden am „Global Runoff Data Centre“ (GRDC) an der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz kompiliert und Nutzern zur Verfügung gestellt. Leider muss man feststellen, dass die GRDC-Datenbank weder räumlich noch zeitlich die Kontinente komplett abdeckt. Die Abdeckung ist sogar seit einigen Jahren rückgängig. Aus verschiedenen Gründen stellen viele nationale hydrologische Behörden ihre Daten nicht mehr zur Verfügung oder dünne ihre Messnetze aus. Ähnliches gilt für die Beobachtung weiterer hydrologischer Variablen wie Niederschlag oder Verdunstung. Satellitengestützte Beobachtung scheint hier die einzige Möglichkeit, dem Problem zu begegnen.

Die klassische Satellitenaltimetrie eröffnet hier tatsächlich gewisse Möglichkeiten, obwohl zu große Hoffnungen von vornherein gedämpft werden müssen. Es sei daran erinnert, dass der Bodenfusspunkt einer Altimetermessung einen Durchmesser von etlichen Kilometern hat. Nur größere hydrologische Objekte können somit erfasst werden. Des Weiteren misst ein Altimeter grundsätzlich die Höhe, also den See- oder Flusspegel; der Bodenfusspunkt des Satelliten stellt sozusagen eine virtuelle Pegelstation dar, siehe (06). Dies ist aber aus hydrologischer Sicht weniger relevant. Vielmehr benötigt die Hydrologie Abflussdaten. Beide Probleme werden aktiv erforscht am Geodätischen Institut:

- Welche hydrologischen Objekte kann die Satellitenaltimetrie (noch) erfassen?
- Kann eine Zeitreihe von Höhenmessungen in Abflussinformation umgewandelt werden?

Die zweite Frage kann in Prinzip mit einem Ja beantwortet werden, weil die Abfluss-



Mit dem Altimetersatelliten Envisat bestimmte Flusspegelstände. Die roten vertikalen Balken stellen den Messfehler dar.

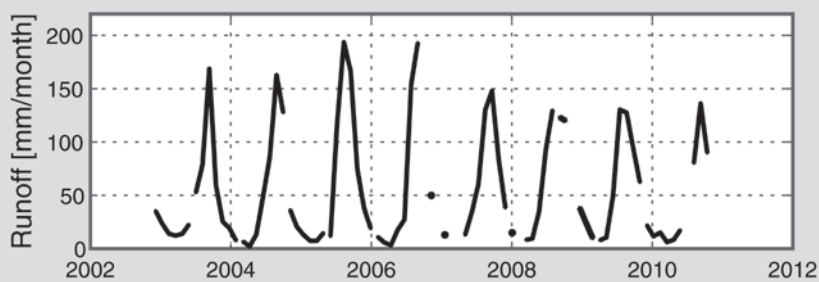
(06) Wo die Satellitenbodenspur den Fluss kreuzt, entsteht eine virtuelle Pegelstation.

zeitreihen sehr stark mit den Flusspegelständen korrelieren. Nur ist die Feststellung einer hohen Korrelation in diesem Fall keine Lösung des Problems, weil dafür gleichzeitig gemessene Datensätze benötigt werden. Und wenn die Abflüsse schon gegeben sind, braucht man die altimetrisch bestimmten Höhen nicht umwandeln in demselben Zeitraum. Die eigentliche Frage ist also, ob vergangene Abflussdaten die richtige statistische Information besitzen, um heutige Altimetermessungen in Abflussinformation umzuwandeln. Ein Beispiel für diese Fragestellung ist der Mekong, für den Abflussmessungen nur in den Zeiträumen 1960–1970 und 1991–1994 zur Verfügung stehen. Der Flusspegel wird in (07) aus der Altimetermission Envisat bestimmt.

Weil die Abflüsse aus der Vergangenheit bekannt sind, wird die Statistik der beiden Datensätze miteinander verglichen. Auch wenn die Datensätze nicht synchron sind, passen die statistischen Verteilungen gut zueinander, so dass man zuversichtlich mit einem Ansatz über Quantilfunktionen die aktuellen Altimeterdaten in Abflussinformation umwandelt.

Echte Zuversicht entsteht dabei aber erst, wenn die Ergebnisse validiert werden. Dazu nimmt man ein Flussbecken mit ausreichend Abflussdaten, auch synchron zur Satellitenaltimetrie. Die synchronen Abflussdaten werden dann aber ausgelassen und der statistische Ansatz nur mit vergangenen Abflussdaten angewandt. Die aus Altimetrie prädierten Abflussinformationen können nun unabhängig mit den ausgelassenen Abflussmessungen verglichen werden. Diese Art von Validation wird in (09) für den Amazonas durchgeführt. Es zeigt sich eine Prädiktionskapazität mit einem Fehler, der weniger als zehn Prozent vom Signal beträgt.

Dieses Ergebnis bestätigt sich in der Analyse



08

Altimetrisch bestimmte Flusspegelstände werden mit einem statistischen Ansatz in Abflussinformation transformiert.

(09) Gemessene (schwarz) und aus Satellitenaltimetrie bestimmte Abflüsse (blau) im Amazonasbecken.

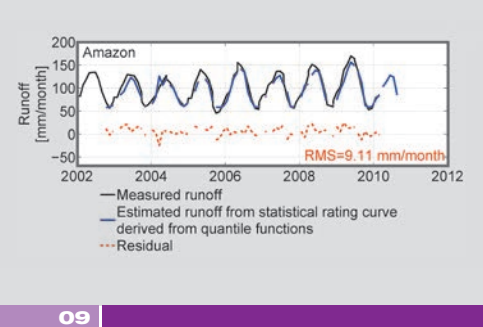
weiterer Flüsse. Die Satellitenaltimetrie stellt somit als Beobachtungssystem eine wesentliche Ergänzung für die Hydrologie dar. Für die wichtigsten (weil größten) Flusssysteme der Welt können im Zeitraum der Satellitenaltimetrie Abflussinformationen hergestellt werden mit einer Qualität, die für die hydrologische Modellierung ausreicht.

#### 4. Fazit und Ausblick

In diesem kurzen Beitrag konnte die Rolle der Satellitengeodäsie als messende Ingenieursdisziplin in der Erdsystem- und Klimaforschung anhand zweier Satellitenverfahren dargestellt werden. Wie gezeigt wurde, liefert die Satellitengravimetrie Information zu Massenverlagerungen im System Erde. Zum Beispiel kann dadurch der Wasserkreislauf, der auch ein Massenkreislauf ist, großskalig erfasst werden. Unter anderem erlaubt die Satellitengravimetrie quantitative Aussagen über das Abschmelzverhalten der großen Eisschilde und Gletscher der Welt und über den Wasserkreislauf in kontinentalem Maßstab.

Die Satellitenaltimetrie liefert komplementär dazu eine geometrische Messgröße. Global wird die Höhe der Meeresoberflächen, eine wichtige Variable in der Klimaforschung, überwacht. Auch der defizitären Situation der globalen Abflussmessungen wird mit der Satellitenaltimetrie geholfen.

Die Satellitenaltimetrie ist mit der geplanten europäischen Mission Sentinel-3 für die nächste Zukunft gesichert. Auch weitere Altimetersatelliten werden im All tätig sein. Zum Beispiel leistet sich China als aufstrebende Weltraummacht unter dem Namen Hai-Yang eine Flotte von Ozeanbeobachtungssatelliten, darunter auch einen Altimetersatelliten. Die hydrologische Anwendung von Satellitenaltimetrie wird



09

künftig nur an Bedeutung gewinnen. Durch verbesserte Messtechniken werden kleinere hydrologische Objekte künftig auch erfasst werden können mit gleichzeitiger Verbesserung der Raum-Zeit-Abtastung. Aus der amerikanisch-französischen Schiene der Topex/Poseidon und Jason-Satelliten wurde zum Beispiel das Konzept der SWOT-Altmetrie geboren. Mit InSAR-Technik soll dabei nicht nur im Fusspunkt gemessen werden, sondern in einem breiten Streifen um die Bodenspur herum. Ähnliches wird im deutschen TanDEM-L Konzept des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) vorgeschlagen. Die Zukunft der Satellitengravimetrie ist weniger sicher. GRACE war die erste Mission, die überhaupt in der Lage war, zeitliche Variationen im Schwerfeld mit der genannten räumlichen Auflösung zu beobachten. Obwohl noch immer messbereit, ist die Mission schon lange über ihre „Haltbarkeitsfrist“ hinaus. Vermutlich wird sie noch dieses Jahr beendet. Eine GRACE-Nachfolgemission wurde von US-amerikanischer und von deutscher Seite genehmigt. Sie wird aber voraussichtlich erst ab 2017 fliegen. Die Nachfolgemission wird in Prinzip dieselbe Hardware an Bord haben, so dass nicht mit besseren Genauigkeiten oder einer besseren räumlichen Auflösung gerechnet werden darf. Verbesserte Satellitengravimetrieemissionen werden zwar untersucht und konzipiert, eine genehmigte Mission liegt aber noch nicht vor.

Der Blick aus dem All ist vom Charakter her global und synoptisch, wodurch man das Gesamtsystem „Erde“ besser verstehen lernt. Wichtig dabei ist jedoch, dass die Messreihen langfristig angelegt sind. Eine Zeitreihe von zehn Jahren reicht im Rahmen einer Klimadebatte schlichtweg nicht. Kontinuität kann wichtiger sein als hohe Genauigkeit.

• Nico Sneeuw,  
Mohammad J. Tourian, Balaji Devaraju

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Satellitengravimetrie misst großskalige Massenänderungen im Erdsystem. Sie erlaubt dadurch zuverlässige Aussagen über Prozesse wie Abschmelzverhalten der grönländischen oder westantarktischen Eiskappen, der kontinentalen Gletscher, großräumige Grundwasserentnahme und, schließlich, Meeresspiegelanstieg durch kontinentale Süßwassereinträge in den Ozean. Die Satellitenaltimetrie ist dagegen ein geometrisches Messverfahren. Sie misst zwar auch den Meeresspiegel und somit den Meeresspiegelanstieg, erfasst aber zusätzlich zur Massenkomponente noch die thermische Ausdehnung. Des Weiteren wird die Satellitenaltimetrie zur langfristigen Beobachtung hydrologischer Objekte wie Binnenseen und Flüsse eingesetzt. Dies ist insofern wichtig, als der Datensatz aus terrestrischen Pegel- und Abflussmessungen relativ dünn ist und sich im Laufe der vergangenen Jahre sogar verschlechtert hat. Außer der Fokussierung auf die quantitative Rolle der Satellitengeodäsie wird in diesem Beitrag die Relevanz langfristiger Beobachtung des Erdsystems betont und das Zusammenspiel von geometrischen und physikalischen Messgrößen hervorgehoben.

## Literatur

- Bindoff NL et al. (2007). Observations: oceanic climate change and sea level. In: Solomon S et al. (Eds.) IPCC climate change 2007: the physical science basis. Cambridge University Press
- Kehlmann D (2005). Die Vermessung der Welt. Rowohlt, ISBN 3-498-03528-2
- Schellnhuber HJ (2009). Tipping elements in the Earth System. PNAS, Vol. 106, Nr. 49, S. 20561–20563
- Torge W (2005). The International Association of Geodesy 1862 to 1922: from a regional project to an international organization. J Geodesy, Vol. 78, S. 558–568

## DIE AUTOREN

## Kontakt

Universität Stuttgart  
Geodätisches Institut  
Geschwister-Scholl-Str. 24D  
D-70174 Stuttgart  
Nico Sneeuw  
+49 (0) 711/685-83390  
sneeuw@gis.uni-stuttgart.de



Von links nach rechts: Sneeuw, Tourian, Devaraju.

## PROF. DR.-ING. NICO SNEEUW

studierte Geodäsie an der Technischen Universität Delft, Niederlande. An der Technischen Universität München promovierte er 2000 zur Thematik der Satellitengeodäsie. Anschließend nahm er 2001 einen Ruf an die University of Calgary, Kanada, an, wo er bis 2005 im Department of Geomatics Engineering tätig war. Als Humboldt-Stipendiat hat er 2004 an der Universität Stuttgart das Geodätische Institut kennengelernt, dessen Institutsleiter er seit 2005 ist. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Satellitengeodäsie; insbesondere erforscht er die Nutzung von Satellitengravimetrie und Satellitenaltimetrie in der Erdsystemforschung.

## MOHAMMAD J. TOURIAN M.Sc.

ist seit 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Geodätischen Institut und am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Abteilung Hydrologie und Geohydrologie. Er erhielt seinen Bachelor-Abschluss im Bauingenieurwesen, Spezialisierung Vermessungstechnik, von der Universität Teheran. Er schloss sein Masterstudium in Geodäsie mit einer Masterarbeit über die Gezeitenmodellierung mit Satellitenaltimetrie an der Universität Teheran ab. Derzeit erforscht er in einem DFG-Projekt im Schwerpunktprogramm SPP1257 die direkte Bestimmung terrestrischer Wasserbilanzen. In seiner Forschungsarbeit beschäftigt er sich mit der Anwendung von satellitengestützten geodätischen Sensoren in der Hydrologie.

## BALAJI DEVARAJU M.Sc.

erhielt einen BSc-Abschluss an der Anna University, Chennai, Indien. Daran schloss sich ein MSc Studium Geomatics Engineering an der University of Calgary, Kanada, an, wo er das kanadische Höhensystem untersuchte. Ab 2006 erforscht er am Geodätischen Institut im Rahmen eines DFG-Projekts im Schwerpunktprogramm SPP1257 die direkte Bestimmung terrestrischer Wasserbilanzen. Kern seiner Forschung ist die Satellitengravimetrie und die Assimilation verschiedener satellitengeodätischer Messgrößen.