

System Erde

GFZ-Journal

GFZ

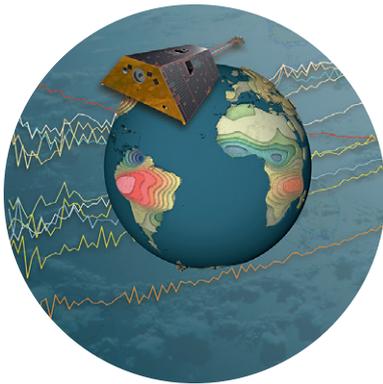
Helmholtz-Zentrum
POTSDAM

2017 – Heft 2

SCHWERPUNKT

**Der Blick von oben
Satelliten in den
Geowissenschaften**





Titelbild

Die GRACE-FO-Satelliten und Wassermassenvariation im April 2011 berechnet aus GRACE-Echtdaten (Grafik: M. Rother, GFZ). Hinterlegt sind simulierte Geoid-Höhenfehler für GRACE-FO unter realistischen Annahmen der erwarteten Genauigkeit der GRACE-FO-Instrumente und Hintergrundmodelle.

*Details in: Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., Güntner, A. (2016): What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? - *Surveys in Geophysics*, 37, 2, p. 453-470. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>*

Über „System Erde“

Mit dem Journal „System Erde“ berichtet das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ über die unterschiedlichen Facetten seiner Forschungsarbeiten. Die Reihe richtet sich vor allem an Entscheidungsträger in Wissenschaft, Gesellschaft und Politik, an interessierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie an die fachinteressierte Öffentlichkeit.

Impressum

Herausgeber:

Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard Hüttl
Dr. Stefan Schwartze

Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Redaktion:

Dr. Dietlinde Friedrich (Koordination)
Dr. Oliver Bens
Dr. Sibylle Itzerott
Dr. Tilo Schöne
Josef Zens (V.i.S.d.P.)

Layout:

Grit Schwalbe, GFZ

Druck:

Arnold group, Großbeeren

Redaktionsschluss: 20. Dezember 2017
ISSN 2191-8589

Alle Abbildungen GFZ, soweit nicht anders gekennzeichnet



Alle Artikel auch im Internet verfügbar:
systemerde.gfz-potsdam.de

Editorial



Der Blick von oben – Satelliten in den Geowissenschaften

Eine blank polierte Metallkugel, die das Licht der Sonne reflektierte, dazu vier Antennen, die ein piepsendes Signal in die Empfänger auf der Erde sendeten. Fliegen und Funken – mehr brauchte es anfangs nicht. Die einen jubelten, die anderen waren geschockt. Mit „Sputnik-1“ war es der Sowjetunion vor 60 Jahren gelungen, erstmals ein von Menschenhand geschaffenes Objekt in eine Erdumlaufbahn zu bringen: einen Satelliten. Das Raumfahrtzeitalter hatte begonnen. Bald darauf reisten auch Menschen in diese

unbekannte und lebensfeindliche Umgebung, ja sogar bis zum Mond. Und auch die Satelliten wurden immer besser, sie konnten Temperatur und Strahlung messen und Bilder von der Erdoberfläche aufnehmen.

Die Technologie war vielfach militärisch getrieben, doch sie eröffnete auch den Geowissenschaften völlig neue Möglichkeiten. Satelliten können in nahezu jeden Winkel der Erde „schauen“ und liefern so Informationen aus entlegenen Regionen, die nur mit Mühe von Expeditionen zu erreichen sind. Welche Fortschritte in der grundlegenden Erforschung des Systems Erde mit Hilfe von Satelliten möglich sind, aber auch welche praktischen Anwendungen, können Sie in dieser Ausgabe des GFZ-Journals „System Erde“ erfahren.

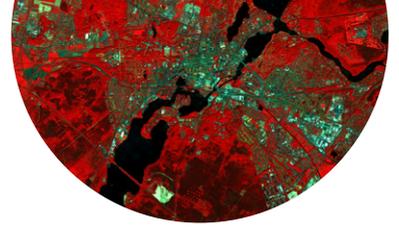
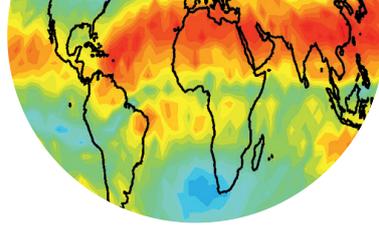
Bestes Beispiel für solche großen Fortschritte sind die Vermessungen des Erdschwerefelds, eine Spezialität der Potsdamer Geoforschung, für die wir weltweit anerkannt und gefragt sind. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Erdschwere noch mit mechanischen Pendelapparaten bestimmt. Auf dem Potsdamer Telegrafenberg wurden die Teilnehmer der ersten deutschen Antarktis-Expedition (1901 bis 1903) im Umgang mit den Geräten geschult, damit sie zuverlässige Daten im Südpolargebiet erheben konnten, unter großen Strapazen und nur an wenigen Punkten. Die Satellitenmission GRACE, deren wissenschaftliche Leitung auch am GFZ liegt und die 15 Jahre erfolgreich lief, hat das Erdschwerefeld bis Ende 2017 flächenhaft vermessen. Mehr noch, sie hat monatliche Veränderungen registriert, und das weltweit. Die präzisen Daten haben unter anderem den Gletscherschwund in Grönland, regionale Änderungen des Meeresspiegels und überhöhte Entnahme von Grundwasserressourcen dokumentiert. Die Nachfolgemission GRACE-FO, an der das GFZ ebenfalls führend beteiligt ist, steht mit Erscheinen dieses Hefts schon fast auf der Startrampe. Sie wird die langfristigen Messungen mit noch größerer Genauigkeit fortführen.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am GFZ sind auch an etlichen weiteren wissenschaftlichen Satellitenmissionen beteiligt, denn ohne den Blick aus dem All können wir das System Erde nur schwerlich in seiner Komplexität verstehen und seine vielfältigen Wechselbeziehungen aufdecken. Dazu vermessen wir auch das Erdmagnetfeld, das unseren Planeten vor dem gefährlichen Sonnenwind schützt, und wir nutzen Fernerkundungsdaten von verschiedensten Satellitensystemen, die etwa klimabedingte Veränderungen der Erdoberfläche anzeigen oder Daten zu den Georessourcen Boden und Wasser liefern.

Lassen Sie sich von den Autorinnen und Autoren mitnehmen auf eine Reise ins All und gewinnen Sie neue Einblicke auf die Erde und die Wissenschaft am GFZ.

Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard F. Hüttl
Wissenschaftlicher Vorstand

Dr. Stefan Schwartze
Administrativer Vorstand



Inhalt

6 Nützliche neue Begleiter am Himmel Satelliten als Erdbeobachtungsinstrumente haben eine lange Tradition auf dem Potsdamer Telegrafenberg

Josef Zens, Frank Flechtner, Jens Wickert, Christoph Förste, Claudia Stolle, Ludwig Grunwaldt, Johannes Leicht, Dietlinde Friedrich, Sibylle Itzerott

12 Beobachtung von Massentransporten im System Erde mit GRACE und GRACE-FO

Frank Flechtner, Christoph Dahle, Ludwig Grunwaldt

18 Ozeanographische Anwendungen der GRACE-Mission

Henryk Dobslaw, Saskia Esselborn, Maik Thomas

24 Erdbeobachtung mit Navigationssatelliten

Jens Wickert, Galina Dick, Maorong Ge, Torsten Schmidt, Maximilian Semmling, Fadwa Alshawaf, Christina Arras, Milad Asgarimehr, Andrey Babeyko, Zhiguo Deng, Stefan Heise, Jürgen Klotz, Xingxing Li, Cuixian Lu, Benjamin Männel, Markus Ramatschi, Tzvetan Simeonov, Sibylle Vey, Florian Zus, Harald Schuh

32 Geomagnetismus und Partikelstrahlung im Weltraum

Claudia Stolle, Yuri Shprits, Jan Saynisch, Foteini Vervelidou, Jürgen Matzka

38 Satellitenfernerkundung von Land- oberflächen – Beginn einer neuen Ära

Daniel Spengler, Robert Behling, Sabine Chabrilat, Hannes Diedrich, Doris Dransch, Saskia Förster, Mahmud H. Haghighi, André Hollstein, Sibylle Itzerott, Theres Kuester, Christian Mielke, Robert Milewski, Mahdi Motagh, Sigrid Roessner, Daniel Scheffler, Mike Sips, Karl Segl, Alexandra Wolanin, Luis Guanter

50 **Netzwerk**

68 **Ausgezeichnet**

71 **Bücher**

Nützliche neue Begleiter am Himmel

Satelliten als Erdbeobachtungsinstrumente haben eine lange Tradition auf dem Potsdamer Telegrafenberg

Josef Zens¹, Frank Flechtner¹, Jens Wickert¹, Christoph Förste¹, Claudia Stolle¹, Ludwig Grunwaldt¹, Johannes Leicht², Dietlinde Friedrich¹, Sibylle Itzerott¹

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam

² Geschichtslotsen, Potsdam

A glance at the stars and, based on their location in the night sky, the calculation of your individual position on Earth was one of the three approaches used 125 years ago by the Royal Prussian Geodetic Institute on the Telegrafenberg. When “Sputnik 1”, the Earth’s first artificial escort (lat. Satellite), took up duty in 1957 the night shift for an astronomical geodesist changed dramatically. From that moment on not only objects from the catalog on stars were taken into account but satellites were now also tracked. Since then, the role of satellites in all geoscientific research has been steadily increasing. For a long time, satellites have not only provided details on position, but this modern positioning also provides exciting insights into the Earth’s atmosphere. Furthermore, for years, satellites themselves have also provided images of the Earth’s surface so that geo-researchers can, thus, analyze ongoing processes on the surface of our planet. This paper presents a loose outline of the development of satellite application on the Telegrafenberg and puts the reader in the mood for the following articles on geoscientific applications of satellites at the GFZ.



Seit Tausenden von Jahren bereits nutzen Menschen die Sterne zum Navigieren. Nicht nur der Polarstern weist den Weg nach Norden, sondern auch andere Gestirne und deren Höhe über dem Horizont. Aus der Position der Sterne und Planeten am Nachthimmel sowie deren Bahndaten lassen sich auch Rückschlüsse auf unseren eigenen Planeten ziehen, etwa zum „Tauseln“ der Erdachse, der so genannten Präzession. Seit gut 60 Jahren helfen uns zusätzlich künstliche Monde, die Satelliten, bei der Navigation und Erdbeobachtung. Den Anfang machte Sputnik 1. Sputnik heißt auf Russisch Begleiter oder Trabant. Der etwas mehr als 80 kg schwere, kugelförmige Sputnik 1 wird am 4. Oktober 1957 vom sowjetischen Weltraumbahnhof Baikonur aus in eine erdnahe Umlaufbahn geschossen. Was für den Westen zunächst ein Schock ist, erweist sich für die Wissenschaft rasch als Segen. Zahlreiche weitere künstliche Himmelskörper werden dem sowjetischen Flugkörper in den kommenden Jahrzehnten folgen.

Obwohl gewissermaßen nur passiv genutzt, sind bereits die ersten Satelliten bahnbrechend für die Erdbeobachtung. Aus der exakten Vermessung ihrer Orbits lassen sich Rückschlüsse auf das „Schwerefeld“ und die genaue Gestalt des Erdkörpers ziehen. Denn wäre unser Planet eine vollkommene Kugel, so würde ein Satellit mit seiner Bahn eine fest im Raum stehende Ellipse beschreiben. Da aber die Erde durch die Erdrotation an den Polen



Abb. 1: Vor 60 Jahren – Beginn der Satellitengeodäsie auf dem Telegrafenberg in Potsdam: Bahnvermessung des Sputnik 2 mit AT-1 und Stoppuhr (Foto: V. Kroitzsch)

Fig. 1: The beginning of satellite geodesy on the Telegrafenberg in Potsdam 60 years ago: Optical orbit tracking of Sputnik with AT-1 and a stop watch

etwas abgeplattet ist, wird aus der Ellipse eine Art sich um die Erde windende Spirale. So wollen es die Gesetze der Schwerkraft. Mehr noch: Wenn der künstliche Trabant beim Umkreisen der Erde unregelmäßig verteilte Massen wie Gebirge und Tiefseegräben passiert, kommt es zu weiteren Veränderungen seiner Flugbahn. Wer nur genau genug misst, erhält also auch Auskunft über das Schwerefeld der Erde.

Sputnik ändert alles

Dass die Schwerkraft nicht an jeder Stelle des Globus konstant ist, hatten Potsdamer Wissenschaftler bereits Ende des 19. Jahrhunderts mit hoher Genauigkeit festgestellt. Ihr Messwerkzeug waren komplizierte Pendelapparate gewesen. Die Messungen des Königlich-Preußischen Geodätischen Instituts waren damals von so hoher Präzision, dass Geodäten aus aller Welt nach Potsdam reisten, um dort ihre Apparate an einer ganz bestimmten Stelle zu eichen. Noch heute zeugt die rote Steinplatte vor dem Gebäude A17 von diesem „Potsdamer Schwerewert“, der zwischen 1909 und 1971 als weltweiter Referenzwert galt.

Mit den Sputnik-Satelliten ändert sich das von Grund auf. Nachdem der Start von Sputnik 1 noch unangekündigt erfolgte, wird die Beobachtung von Sputnik 2 sorgfältig vorbereitet. Die sowjetische Akademie der Wissenschaften verteilt dafür spezielle Teleskope, mit denen die Bahn dieses Satelliten verfolgt werden kann. Zu den 70 Stationen auf dem Gebiet der damaligen Sowjetunion, die die Bahn beobachteten, kommen innerhalb kurzer Zeit nach dem Start mehr als 100 hinzu. Anfang des Jahres 1958 beteiligen sich über 200 Stationen in fast drei Dutzend Staaten der Welt an der Bahnvermessung des russischen „Begleiters“ und seiner weiteren, bald folgenden Gefährten im All. Auf diese Weise kann die Erdabplattung mit bis dahin unerreichter Genauigkeit bestimmt werden (Merson et al., 1958).

Links: Satelliten sind heute ein Universalwerkzeug der Forschung, auch für die Geowissenschaften sind sie längst unersetzlich geworden. Die Fernerkundung des Systems Erde deckt den gesamten Bereich ab von der bildlichen Erfassung der Erdoberfläche über das Schwere- und Magnetfeld bis hin zu praktischen Anwendungen etwa im Bereich der Meteorologie. Das GFZ war und ist wesentlich bei Entwicklung, Bau und Betrieb zahlreicher geowissenschaftlicher Satellitenmissionen und -systeme beteiligt. Ziel ist die großräumige, flächendeckende und multitemporale Erfassung der Landoberflächen, der Ozeane, der Atmosphäre und des erdnahen Weltraums. (Bild im Hintergrund: Blick von der Internationalen Raumstation 2003; ISS Expedition 7 Crew, EOL, NASA)

Left: Today, satellites are a universal tool in research; they have likewise long become irreplaceable in the geosciences. Remote sensing of System Earth encompasses the entire field from visualization of the Earth's surface over the gravitational and magnetic field to practical applications in the field of meteorology. The GFZ has been and is significantly involved in the development, construction and operation of many geoscientific satellite missions and systems. The goal is the large-scale, comprehensive and multi-temporal registration of land surfaces, the oceans, the atmosphere and the Earth's immediate space environment.



Kontakt: J. Zens
(josef.zens@gfz-potsdam.de)

Es sollte nur wenige Jahre dauern, bis eigens für die Geodäsie entwickelte Satelliten zum Einsatz kommen. Der 1966 gestartete Ballonsatellit „PAGEOS“ (Passive Geodetic Satellite) der NASA beispielsweise hat eine spiegelnde Hülle, die ihn wie eine riesige Metallkugel aussehen lässt. Mit seinem 30 m Durchmesser ist er sogar auf seiner 4000 km hohen Umlaufbahn mit bloßem Auge zu erkennen. Ganz anders dagegen die LAGEOS-Flugkörper (Laser Geodynamics Satellite), die mit ihrem 60 cm Durchmesser und den vielen Reflektoren eher an eine Disco-Kugel erinnern.

Laser halten Einzug in die Vermessung

Die Vermessung der Bahnen per Laser erfolgt ab den 1970er Jahren mit immer größerer Genauigkeit, die heute im Millimeterbereich liegt. Aus den Beobachtungen lassen sich z. B. jährliche Schwankungen der Erdabplattung an den Polen ermitteln. Die Ursache für diese Schwankungen sind Eis- und Schneeschmelze in den Polarregionen sowie Landhebungen auf der nördlichen Hemisphäre nach dem Rückgang der eiszeitlichen Vergletscherung. Der Telegrafenberg spielt bei diesen Messungen stets eine wichtige Rolle. Verfolgten die Potsdamer Geowissenschaftler Sputnik 2 noch mit Teleskopen auf Stativen und einer Stoppuhr (Abb. 1), so erhält das damalige Geodätische Institut Potsdam 1966 eine Spezialkamera für Satellitengeodäsie, angefertigt von der Firma Carl Zeiss in Jena. Der Helmerdturm wird eigens für diese Kamera – auch SBG für Satellitenbeobachtungsgerät genannt – umgebaut. 1974 hält die Lasertechnik auf dem Telegrafenberg Einzug, indem das SBG mit einem Rubin-Laser umgerüstet wird.

Unterdessen sind zu den passiven Satelliten auch aktive hinzugekommen. War die Erdbeobachtung aus dem All zunächst den Militärs vorbehalten, gewinnen die Satelliten rasch an Bedeutung für die Wissenschaft. Sie haben Sensoren an Bord, die Bilder und Messdaten aufnehmen und an Bodenstationen übermitteln. Dazu zählen zum Beispiel hochauflösende Kameras, die Licht in unterschiedlichen Wellenlängen einfangen – Multi- und später Hyperspektralkameras.

Eine der ersten dieser Art, die MKF-6 (wiederum von Carl Zeiss Jena, Abb. 2 und Infobox unten links), fliegt an Bord der sowjetischen Raumstation „Saljut 6“ und wird dort von Sigmund Jähn bedient, dem ersten Deutschen im All. Jähn wurde am Potsdamer Zentralinstitut Physik der Erde in der Fernerkundung promoviert, und ein Denkmal auf dem Telegrafenberg vor dem Helmerdturm erinnert an seinen siebentägigen Raumflug Ende August 1978.

Die kuriose Geschichte des GFZ-1-Satelliten

Ob es ein Sinn für Ironie war oder nur Zufall, ist heute nicht mehr zu klären. Jedenfalls beginnen die geowissenschaftlichen Satellitenmissionen des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ in Potsdam auch mit einem „Trabant“, wie der russische Sputnik auf Deutsch heißt. Der „Space-Trabbi“ (Abb. 3 und Infobox unten rechts) ähnelt aber in seiner Form eher den LAGEOS-Satelliten als dem Ur-Trabanten im All. Sein offizieller Name lautet GFZ-1 (König et al., 1999). 1995 wird die ungefähr fußballgroße Kugel von der Raumstation „MIR“ aus in eine Umlaufbahn gebracht –

Die MKF-6, mit der Sigmund Jähn arbeitete, ist ein Meisterstück des Kamerabaus. Sie hat sechs Objektive und erfasst damit Licht in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen („Spektralen“): 460–500 nm (Blau), 520–560 nm (Grün), 580–620 nm (Gelb-Orange), 640–680 nm (Orange-Rot), 700–740 nm (Rot) und 780–860 nm (nahes Infrarot). Aus einer Höhe von rund 350 km nimmt sie mit den Objektiven sechs Bilder gleichzeitig auf, die jeweils Geländestreifen von etwa 225 km Breite und 155 km Länge umfassen. Die Auflösung beträgt im sichtbaren Bereich 10 bis 20 m. Das komplette Gerät samt Bedienelementen wiegt 175 kg.



Abb. 2: Multispektralkamera MKF-6 (Foto: Ziko (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2009-07-21_ob_22_mkf-6_multispektralkamera.JPG), „2009-07-21 ob 22 mkf-6 multispektralkamera“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>)

Fig. 2: Multispectral camera MKF-6

Die geringe Flughöhe macht GFZ-1 besonders empfindlich für die Erdanziehungskraft und damit sensitiv für die Unregelmäßigkeiten des Erdschwerefelds (Förste, 2017). Durch seine Daten erreicht die satellitengestützte Bestimmung des Schwerefelds der Erde ein weiteres Mal eine bis dahin nicht gekannte Genauigkeit. Es gibt noch eine Besonderheit: Obwohl GFZ-1 erst 1995 in die Umlaufbahn gebracht wird, führt ihn das Committee on Space Research COSPAR unter der Bezeichnung 1986-017JE, weist ihm also das Entstehungsjahr 1986 zu. Das liegt an der unkonventionellen „Start“-Methode, die dazu führt, dass der Space-Trabbi offiziell als Bruchstück der „MIR“ gelistet wird – und die war eben im Jahr 1986 gestartet.



Abb. 3: Der Mikrosatellit GFZ-1, 1995 (Foto: GFZ)

Fig. 3: The microsatellite GFZ-1, 1995

und zwar über die Müllklappe. Mit ihren 60 Prismen ist sie ein gutes Ziel für die Laser-Entfernungsmessstationen auf der Erde. Was GFZ-1 von LAGEOS und PAGEOS unterscheidet, ist in erster Linie seine niedrige Umlaufbahn, die ihn besonders sensitiv für die Unregelmäßigkeiten des Erdschwerefelds macht: Er kreist anfangs in 400 km Höhe über der Erde und sinkt im Lauf der Zeit auf rund 250 km ab, bevor er nach vier Jahren im Orbit verglüht.

CHAMP revolutioniert unser Verständnis der oberen Atmosphäre



Abb. 4: Der CHAMP-Satellit in der Montagehalle, 2000 (Foto: Airbus DS GmbH)

Fig. 4: The CHAMP satellite in the assembly hall, 2000

Die Satellitenmissionen des GFZ werden mit den Jahren immer komplexer. So folgt auf GFZ-1 die multiinstrumentelle CHAMP-Mission (CHALLENGING Mini-satellite Payload, Abb. 4). Dieser Satellit wird in Potsdam konzipiert und vom damaligen Raumfahrtkonzern Astrium gebaut, der später Teil von Airbus (Airbus Defense and Space GmbH) wurde. Der Satellit wiegt etwas mehr als eine halbe Tonne und ist 8,33 m lang – allein der Ausleger für die Magnetfeldsensoren misst gut 4 m. CHAMP startet im Juli 2000 mit einer Kosmos-Rakete von Plessezk (Russland) seine Reise ins All. Am 19. September 2010, nach mehr als dem doppelten der ursprünglich geplanten Missionszeit, ist der Treibstoff verbraucht und CHAMP verglüht beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre.

CHAMP ist mit einem GPS-Empfänger ausgestattet, was im Gegensatz zu der Lasermethode aus GFZ-1 eine kontinuierliche Bahnvermessung im Sekundentakt ermöglicht. Die Auswertung genauer Satellitenbahnen zusammen mit Messungen der nicht-gravitativen Beschleunigung durch die angebrachten Akzelerometerbeobachtungen erhöht die Genauigkeit der Vermessung des Schwerefelds enorm.

Ebenso innovativ ist die GPS-Radiokokkultationsmethode, mit der sich Aussagen zum globalen Wasserdampfgehalt und zur Temperatur der Atmosphäre ableiten lassen (vgl. Beitrag von Wickert et al. in diesem Heft, Seite 24). Diese Werte sind heute Bestandteil der Modelle, die zum Beispiel der Deutsche Wetterdienst für seine tägliche Vorhersage nutzt.

Die CHAMP-Mission revolutioniert die Erforschung des Erdmagnetfelds, der hohen Atmosphäre und Ionosphäre. Erstmals werden kontinuierlich hoch präzise Messungen des Erdmagnetfelds auf einem niedrig fliegenden Satelliten unternommen, die es erlauben, die Säkularvariation des Erdmagnetfelds global zu erfassen. Vor

allem während der letzten Jahre mit niedrigem Orbit werden durch CHAMP-Messungen die bis heute genauesten globalen Karten des Magnetfelds der Lithosphäre erstellt. Erstmals ist es möglich, diese elektrischen Ströme in der Ionosphäre zu beobachten, die bisher nur aus theoretischen Überlegungen vorhergesagt wurden, aber nun den Zusammenhang zwischen oberer Atmosphäre (Neutralgas), deren ionisierten Anteil und dem Erdmagnetfeld beweisen. Hermann Lühr und Kollegen entdecken unter anderem, dass sich auch nicht ionisierte neutrale Luft in diesen Höhen entlang des Magnetfelds ausrichtet und dass kleinräumige Strukturen der Elektronendichte eine Signatur im Magnetfeld hinterlassen (Lühr et al., 2012). Eine umfangreiche Zusammenstellung der multidisziplinären Ergebnisse der erfolgreichen CHAMP-Mission ist in Reigber et al. (2005) zu finden.

Auf den Erfahrungen von CHAMP aufbauend konzipiert die Europäische Raumfahrtagentur ESA eine weitere Satellitenmission: Swarm (Englisch für Schwarm). Drei baugleiche Satelliten umkreisen in einer Höhe von 400 bis 520 km Höhe seit 22. November 2013 die Erde. Die multiinstrumentelle Konstellation misst das Erdmagnetfeld und geophysikalische Variationen im erdnahen Weltraum mit bisher höchster Präzision (vgl. Beitrag von Stolle et al. in diesem Heft, Seite 32).

Die (beinahe) ewige Jagd im All

Möglichst kontinuierliche Datenreihen sind das A und O der Forschung. So startet am 17. März 2002, während CHAMP noch fliegt, das Satellitenduo GRACE. Das Akronym steht für Gravity Recovery And Climate Experiment. GRACE wird sich zur bislang langlebigsten Satellitenmission des GFZ entwickeln: Ursprünglich auf fünf Jahre angelegt, verdreifachen die beiden Satelliten die Zeit ihrer endlosen Verfolgungsjagd um den Globus in der Anfangshöhe von knapp 500 km Höhe. Ende des Jahres 2017 wurde die Absturzphase eingeleitet. GRACE-2 verglühte am 24. Dezember 2017 in der Erdatmosphäre, während GRACE-1 noch bis zum März 2018 seine letzten Bahnen zieht. In den 15 Jahren Missionszeit lieferten „Tom und Jerry“ – so genannt wegen des Hintereinanderherjagens – nochmals genauere Daten zum Erdschwerefeld und seinen zeitlichen Veränderungen. Aus den monatlichen Karten des Schwerefelds lassen sich Informationen destillieren, die man zuvor für nicht möglich gehalten hatte: Eismassenbilanzen von Grönland oder der Antarktis lassen sich ebenso aufstellen wie deren Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg (vgl. Beitrag von Dobsław et al. in diesem Heft, Seite 18). GRACE blickt gleichsam unter die Erde und macht die Schwankungen des Grundwassers sichtbar. Das Satellitenduo ist ein Paradebeispiel dafür, wie aus einer verrückt klingenden Idee – aus winzigen Abstandsänderungen zweier Satelliten im All (siehe Infobox zum Satellite Laser Ranging nächste Seite) Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt an der Erdoberfläche zu ziehen – Realität wurde, mit greifbaren Ergebnissen von hohem Wert für die Klimaforschung und Gesellschaft. Auch die Radiokokkultation spielt bei GRACE eine große Rolle und liefert Daten für die Wettervorhersage.

Satellite Laser Ranging (SLR)

Als Satellite Laser Ranging (Laserentfernungsmessung zu Satelliten, SLR) wird ein kosmisch-geodätisches Verfahren bezeichnet, bei dem die Messung der Flugzeit von Lichtimpulsen zur hochpräzisen Bestimmung der Satellitendistanz genutzt wird. Dabei werden durch eine Bodenstation ultrakurze Laserimpulse mit Hilfe eines Teleskops auf das zu messende Objekt ausgesandt und reflektierte Signale wieder eingefangen. Die Flugzeit Erde-Satellit-Erde sowie die Sende-Epoche des Laserimpulses werden elektronisch registriert und aus der bekannten Lichtgeschwindigkeit kann die genaue Entfernung des Satelliten im Moment der Messung errechnet werden. Moderne SLR-Systeme wie das des GFZ (Abb. 5) gestatten dabei Genauigkeiten von besser als einem Zentimeter, unabhängig von der Entfernung des kosmischen Objekts.



Abb. 5: SLR-Station des GFZ
Fig. 5: SLR station at GFZ

Diese hohe Genauigkeit setzt allerdings voraus, dass der Satellit mit einem speziellen Reflektor ausgerüstet ist, welcher die von der Erde ausgesendeten Laserimpulse exakt in die Richtung der Bodenstation zurücksendet. Das GFZ fertigt seit 1998 derartige Laser-Reflektoren (Abb. 6), die bereits auf einer Vielzahl von Raumflugmissionen zum Einsatz kamen (u. a. CHAMP, GRACE, Swarm oder TerraSAR-X, zukünftig auch auf der ISS). Dabei müssen die von optischen Firmen wie Zeiss Jena hergestellten Prismen höchsten Ansprüchen an die Fertigungsgenauigkeit genügen, um den durch die Geschwindigkeit des Satelliten hervorgerufenen Effekt der Lichtaberration zu korrigieren, der ansonsten zu einer starken Schwächung des Rückkehrsignals führen würde.

Vorteil des Laserverfahrens sind die Kleinheit und der robuste Aufbau des Reflektors am Satelliten, welcher vollkommen passiv arbeitet und selbst

nach dem Ausfall der aktiven Systeme des Raumflugkörpers noch funktioniert. Durch die Verwendung nur einer einzigen Stationsuhr für Flugzeit und Sende-Epoche wirken sich geringe Zeitfehler wesentlich weniger als beim GNSS-Verfahren auf die Entfernungsbestimmung aus, sodass SLR als externes Verfahren zur Kalibrierung und Validierung von Mikrowellensystemen auf vielen modernen Missionen zum Einsatz kommt und auch nahezu alle GNSS-Navigationsatelliten mit Laser-Reflektoren ausgerüstet sind.

Weitere zukünftige Einsatzgebiete des SLR-Verfahrens liegen im hochpräzisen Zeitvergleich von Atomuhren auf weit voneinander entfernten Stationen sowie in der Bahnverfolgung von Weltraumschrott mit deutlich besserer Genauigkeit, als das mit herkömmlichen Radarverfahren möglich ist. Auf beiden Gebieten laufen am GFZ Vorbereitungsarbeiten.

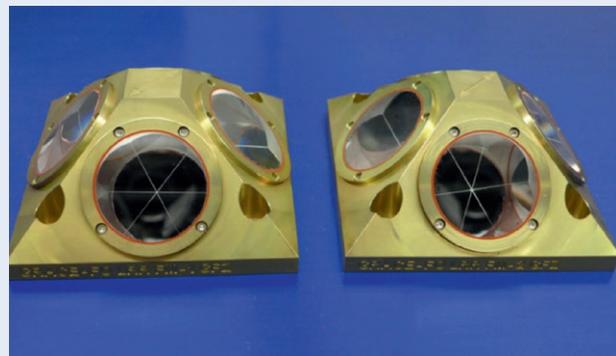


Abb. 6: Laser-Reflektoren für die GRACE-FO-Mission
Fig. 6: Laser reflectors for the GRACE-FO mission

Die von NASA und GFZ realisierte Nachfolgemission des erfolgreichen Duos ist nahezu startbereit. Der „Launch“ ist für das Frühjahr 2018 vorgesehen. GRACE Follow-on (GRACE-FO) soll die Messgenauigkeit ein weiteres Mal erhöhen, um auch noch das letzte Tröpfchen an Information aus den Variationen der Erdanziehungskraft zu wringen (vgl. Beitrag von Flechtner et al. in diesem Heft, Seite 12).

Ausblick

Es ist bei weitem nicht mehr nur die Forschung, die von Satellitenfernerkundung profitiert. Die moderne Landwirtschaft nutzt längst GPS-Navigation und Bodenkarten, um gezielt zu düngen. Sogar Rohstoffprospektion aus dem All ist möglich. Ausgewählte Erdbeobachtungsdaten sind daher über das Copernicus-Programm der Europäischen Union frei verfügbar. Um den Austausch von Informationen zu sichern, wurden „Copernicus Relays“ als Ansprechpartner für potenzielle Nutzer eingerichtet. Für die Region Nord-Ost ist das Relay in Potsdam zuständig, gegründet von GEOkomm, dem Verband der GeoInformationswirtschaft Berlin/Brandenburg, und dem GFZ. Die Sentinel-Satelliten der Europäischen Union werden hierfür wichtige Daten liefern.

Zu den zentralen Instrumenten der Erdbeobachtung gehören Weiterentwicklungen von Geräten wie es die MKF-6 war, Multispektral- und Hyperspektralscanner. Sie erfassen nicht mehr nur sechs Frequenzbänder, sondern hunderte. Aus den Daten solcher hyperspektraler Aufnahmesysteme lassen sich Materialeigenschaften noch besser als aus den bisherigen optischen Multispektraldaten bestimmen. Dabei erlaubt die Nutzung des gesamten optischen Wellenlängenspektrums in hoher Auflösung die detaillierte Abbildung von spektralen Reflexionseigenschaften einschließlich materialspezifischer Absorptions- und Reflexionsbanden.

Dieses Messprinzip wird seit Jahren erfolgreich auf der Labor- und Geländeskala sowie auf flugzeuggetragenen Plattformen eingesetzt. Mit der Satellitenmission EnMAP, an deren Entwicklung das GFZ maßgeblich beteiligt ist, sollen Hyperspektraldaten zukünftig auch von Satelliten aus erhoben werden (vgl. Beitrag von Spengler et al. in diesem Heft, Seite 38). Das GFZ stellt den wissenschaftlichen Leiter der EnMAP-Mission und ist im wissenschaftlichen Vorbereitungsteam verantwortlich für die Entwicklung von Analyseverfahren im Themenfeld von Boden und Geologie. Zusammen mit anderen derzeit in der Entwicklung befindlichen hyperspektralen Satellitenmissionen wird EnMAP die Weiterentwicklung von Methoden zur Informationsgewinnung aus Hyperspektraldaten und die weltweite Erschließung neuer Anwendungsfelder ermöglichen. So können beispielsweise in Kombination mit anderen Daten – seien es Meeresströmungen, Winde oder Klimadaten – Ernteprognosen für die Landwirtschaft erstellt oder auch Eintragswege von Plastikmüll ins Meer sichtbar gemacht werden.

Längst begnügen sich die Forscherinnen und Forscher nicht mehr damit, Daten für einzelne Parameter zu erheben, die sie dann in ihrer Community teilen. Vielmehr konzipieren sie ihre Missionen von Beginn an so, dass auch ein gesellschaftlicher Nutzen entsteht. Sie arbeiten in großen Teams zusammen und integrieren zahlreiche Messmethoden. Mit der neuen Generation von Erdbeobachtungssatelliten und innovativen Verfahren der Verarbeitung immenser Datenmengen machen sie Veränderungen der Umwelt sichtbar und Erkenntnisse für Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft nutzbar.

Literatur

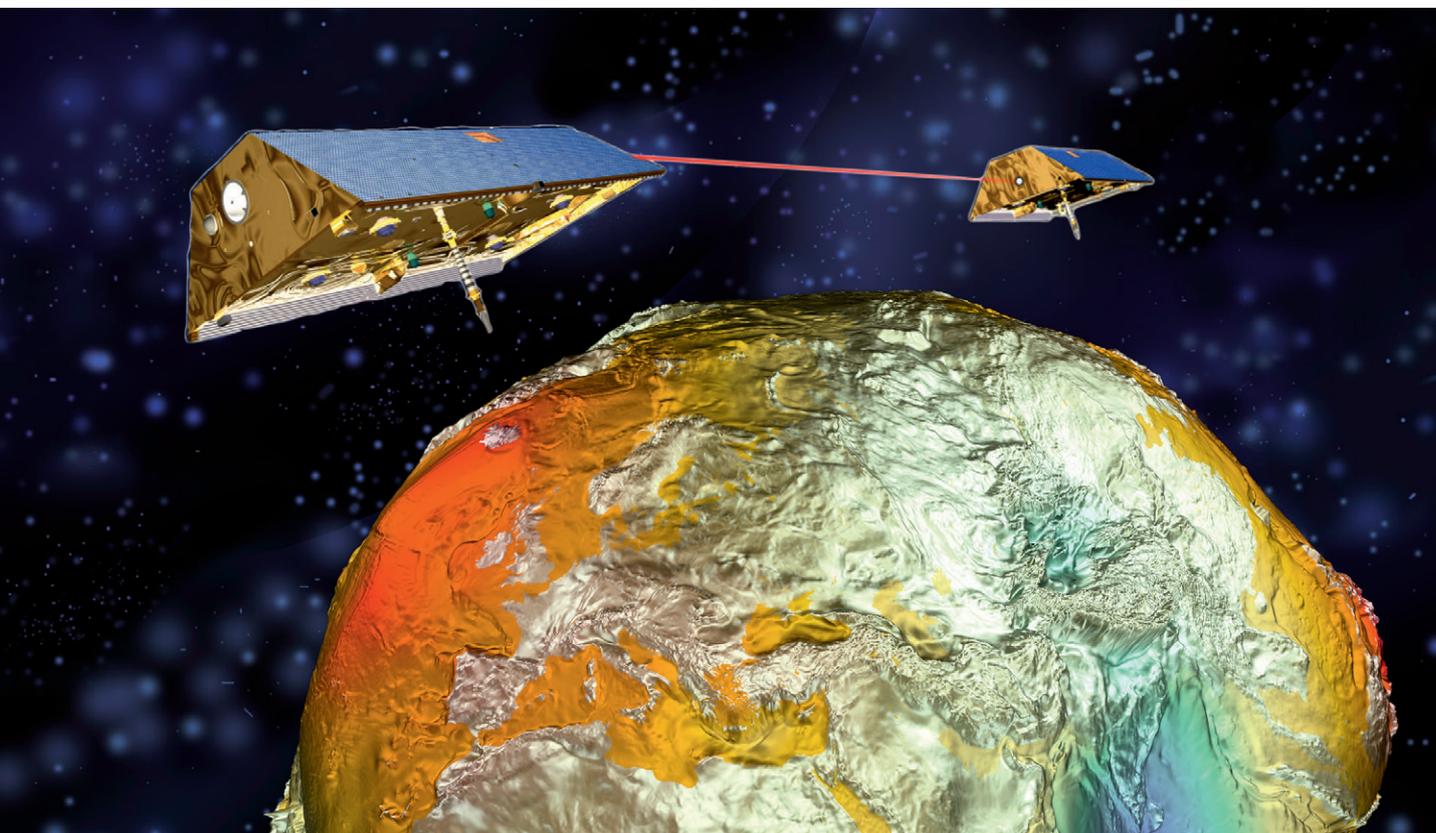
- Förste, C. (2017): Geowissenschaftliche Satellitenmissionen. *Geoscientific Satellite Missions*. - In: Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geo-Forschungszentrum GFZ (Ed.), Fokus: Erde: von der Erdvermessung zum System Erde = Focus: Earth, Berlin, München: Deutscher Kunstverlag GmbH, pp. 104–108.
- König, R., Chen, Z., Reigber, C., Schwintzer, P. (1999): Improvement in Global Gravity Field Recovery Using GFZ-1 Satellite Laser Tracking Data. - *Journal of Geodesy*, 73, pp. 398–406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001900050259>
- Lühr, H., Park, J., Ritter, P., Lui, H. (2012): In-situ CHAMP observation of ionosphere-thermosphere coupling. - *Space Science Reviews*, 168, 1-4, pp. 237–260. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9798-4>
- Merson, R. H., King-Hele, D. G. (1958): Use of artificial satellites to explore the Earth's gravitational field: results from Sputnik-2 (1957ß). - *Nature*, 182, 4636, pp. 640–641. DOI: <https://doi.org/10.1038/182640a0>
- Reigber, C., Schwintzer, P., Lühr, H., Wickert, J. (2005): *Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit*, Berlin [u.a.]: Springer, 628 p.

Beobachtung von Massentransporten im System Erde mit GRACE und GRACE-FO

Frank Flechtner, Christoph Dahle, Ludwig Grunwaldt
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Since March 2002 the GFZ German Research Centre for Geosciences, together with NASA's Jet Propulsion Laboratory (JPL) and the German Space Agency (DLR), operates the twin satellite mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) and is part of the joint US-German Science Data System. Over GRACE's 15+ years of operation, researchers from GFZ and other national/international institutions have developed innovative techniques to use the GRACE mass transport data set and to combine it with other observations and models for new insights into the Earth system. Highlights are the monitoring of changes in the hydrological cycle such as ground water depletion and related droughts, prognosis of floods in large river systems, the melting of Greenland's and Antarctica's ice sheets and large glacier systems, changes in the ocean dynamics and related sea level rise or observation of postseismic relaxation after large earthquakes.

Currently, GFZ implements with JPL/NASA the successor mission GRACE-FO (Follow-on) which is due for launch in early 2018. The primary objective of GRACE-FO is to continue mass transport monitoring as only by long time series reliable conclusions on climate change can be drawn. The secondary objectives are to continue GRACE's radio occultation measurements for provision to Numerical Weather Services and to demonstrate the improvement of the measurement of the inter-satellite separation by an innovative laser ranging interferometer. This is a necessary prerequisite to improve the spatial and temporal resolution by Next Generation Gravity Missions.



Eine der wichtigsten gesellschaftlichen Herausforderungen ist die Erhaltung unserer Lebensräume. Damit einhergehende Fragen lauten: Wie kann der weltweit stetig zunehmende Energiebedarf gedeckt werden, ohne den Klimawandel zu beschleunigen? Mit welchen Modellen können Klimaänderungen verlässlich vorhergesagt werden? Welche Auswirkungen des Klimawandels können beeinflusst werden, an welche muss sich die Gesellschaft anpassen und welche Technologien sind dafür nötig?

An der Beantwortung dieser Fragen wird insbesondere in den Programmen der Forschungsbereiche „Energie“ und „Erde und Umwelt“ der Helmholtz-Gemeinschaft gearbeitet. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit, Strategien für die Anpassung an den globalen Wandel zu entwickeln, wird es immer wichtiger, Systemwissen und wissenschaftliche Daten für die gesellschaftliche Daseinsvorsorge aufzubereiten und verfügbar zu machen. Der Forschungsbereich „Erde und Umwelt“ arbeitet dabei an der Etablierung von Daten- und Wissensplattformen u. a. in den Bereichen Georessourcenmanagement und Erdsystembeobachtung sowie an Frühwarnsystemen und Krisenbewältigungsstrategien für Naturgefahren. Damit wird dringend benötigtes Orientierungs- und Handlungswissen für Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit bereitgestellt und nutzbar gemacht.

Integraler Bestandteil und Voraussetzung dafür ist die großräumige, flächendeckende und multitemporale Erfassung der Landoberflächen, der Ozeane und der Atmosphäre. Nur durch die satellitengestützte Erdbeobachtung können Zusammenhänge innerhalb der und zwischen den unterschiedlichen irdischen Sphären und deren Veränderungen präzise erkannt und die dafür ursächlichen dynamischen Prozesse verstanden werden.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ betreibt aus diesem Grund neben anderen Satellitenmissionen seit 2002 zusammen mit seinen Partnern, dem Jet Propulsion Laboratory (JPL) der US-Raumfahrtbehörde NASA und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), die Zwillingsatellitenmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) und realisiert derzeit zusammen

mit der NASA die Nachfolgemission GRACE-FO (Follow-on), die im Frühjahr 2018 gestartet werden soll.

Messprinzip von GRACE

Die völlig neue Idee bei GRACE ist, über die Messung der Masse Informationen über das System Erde zu gewinnen. Je größer die Masse eines Objekts ist, desto größer ist auch dessen Anziehungskraft. So üben die Alpen beispielsweise eine höhere Anziehungskraft aus als die norddeutsche Tiefebene. Die winzigen Unterschiede sind für Menschen nicht spürbar, aber Satelliten können die Veränderung messen. Sobald sie beim Umkreisen der Erde über eine massereiche Region fliegen, beschleunigen sie minimal, wenn sie darauf zufliegen, und werden wieder langsamer, wenn sie sich von der Masse entfernen.

Der weitaus größte Teil der Erdanziehungskraft rührt von der Masse der festen Erde her. Ein kleiner Teil allerdings geht auf das Wasser auf oder nahe der Oberfläche zurück. Ozeane, Flüsse, Seen, Gletscher und Grundwasser verändern sich dabei viel rascher als das zähflüssige Gestein im Erdinneren, denn sie reagieren auf Jahreszeiten, Stürme, Dürren und andere Wettereffekte. Das Konzept für GRACE entstand aus der Erkenntnis, dass es möglich ist, die daraus resultierenden winzigen Schwerkraftänderungen aus dem All zu messen und so die Geheimnisse des Wasserkreislaufs zu erforschen.

GRACE hat diese Massenveränderungen gemessen, indem deren Auswirkungen auf das Satellitenduo aufgezeichnet wurden. Die beiden baugleichen Satelliten umkreisten unseren Planeten bis Oktober 2017 mit 220 km Abstand zueinander in einer Anfangsbahnhöhe von 500 km. Wurde einer der beiden Satelliten schneller, weil er als erstes ein massereiches Objekt überflog, vergrößerte sich der Abstand um den Bruchteil einer Haaresbreite zum anderen Satelliten. Mittels Mikrowellen konnten diese Änderungen im Mikrometerbereich sehr genau gemessen werden. Hinzu kamen GPS-Empfänger und Sternensensoren, um kontinuierlich die Position und Lage der Satelliten zu bestimmen, sowie ein Beschleunigungsmesser im Massenzentrum der Satelliten, um Bremsseffekte zu erkennen, die etwa durch Reibung an atmosphärischen Teilchen entstehen. Aus all diesen Daten berechneten die Forscherinnen und Forscher des GFZ monatliche Karten der regionalen Änderungen der Erdanziehungskraft und der daraus resultierenden Veränderungen der Massen an der Oberfläche.

Links: Satellitenzwillinge GRACE mit dem Schwerfeld der Erde (in stark überhöhter Form), hergeleitet aus Messdaten der Satelliten CHAMP und GRACE sowie aus Daten der Gravimetrie und Satellitenaltimetrie (Abb.: Astrium/GFZ)

Left: Twin-satellites GRACE with the Earth's gravity field



Kontakt: F. Flechtner
(frank.flechtner@gfz-potsdam.de)

Auswahl wissenschaftlicher Ergebnisse der GRACE-Mission

Seit dem Start von GRACE vor mehr als 15 Jahren haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit Methoden entwickelt und verfeinert, um die GRACE-Schwerefelddaten mit geophysikalischen Modellen und anderen Beobachtungssystemen zu verknüpfen – im Folgenden einige Highlights.

Grundwasserbeobachtung

In Böden und wasserführenden Gesteinsschichten (Aquiferen) gespeichertes Grundwasser kann nur punktuell, z. B. mit Hilfe von Brunnen, gemessen werden. Diese In-situ-Messungen sind aufwendig, teuer und liefern jeweils nur lokale Informationen. GRACE-Massenveränderungen stellen grundsätzlich den integralen Anteil aller hydrologischen Speicherkomponenten dar. Kennt man z. B. aus Satellitendaten wie die der ESA-Mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) die oberflächennahe Bodenfeuchte, aus In-situ-Messungen oder Datenarchiven die Abflussdaten der umgebenden Flüsse sowie die Anteile der Oberflächenwasser und der Schneebedeckung, kann man diese

Massenumverlagerungen von den GRACE-Beobachtungen abziehen und erhält somit Informationen über die mit anderen Messmethoden nur schwer zugänglichen globalen Grundwasserressourcen. Kolleginnen und Kollegen vom Projektpartner JPL haben dabei in den letzten zehn Jahren zahlreiche Aquifere identifiziert, die von Menschen rascher entleert werden, als sie sich erneuern können. 2015 publizierten sie eine Übersicht, die zeigte, dass weltweit ein Drittel der größten Grundwasserbecken dramatisch übernutzt werden (Richey et al., 2015).

Hochwasservorhersage

Systeme zur Vorhersage von Hochwasserereignissen und von Überflutungen brauchen möglichst aktuelle Informationen, um die Hochwasserentstehung und Entwicklung von Flutwellen abschätzen zu können. Für große Einzugsgebiete ergeben sich dann Vorwarnzeiten von einigen Tagen oder wenigen Wochen. Die EU fördert zwischen 2015 und 2017 das an der Universität Bern koordinierte Projekt EGSIEM (European Gravity Service for Improved Emergency Management), um genau solche Near-Realtime-Daten zum Schwerfeld und korrespondierende Hochwasserindikatoren zu berechnen. Für beide Themen hat das GFZ die Gesamtverantwortung (Gouweleeuw et al., 2017). Ein Testbetrieb hat im April 2017 gemeinsam mit dem Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformationen (ZKI) des DLR begonnen.

Eisschilde und Gletscher

Die Antarktis und Grönland gehören zu den unwirtschaftlichsten Orten der Welt. Gleichwohl ist es wichtig zu verstehen, wie schnell die Eisschilde dort abschmelzen, auch um die Schwankungen des Meeresspiegels weltweit besser zu verstehen. Forscherinnen und Forscher, die sich mit der Kryosphäre befassen, gehörten zu den Pionieren bei der Nutzung von GRACE-Daten. Es stellte sich schnell heraus, dass der Massenverlust sowohl auf Grönland als auch in der Antarktis weitaus dramatischer ist als vorher angenommen, denn seit dem Start von GRACE hat Grönland durchschnittlich etwa 230 Milliarden Tonnen (Gt) Eis pro Jahr verloren (Abb. 1), die Antarktis rund 120 Gt jährlich.

Forscher des GFZ (Sasgen et al., 2010) haben gezeigt, wie jahreszeitliche Schwankungen des Schneefalls und die damit verbundene Massenzunahme auf der Antarktischen Halbinsel mit der Stärke eines Tiefdrucksystems über der Amundsensee zusammenhängen. Dieses Tiefdruckgebiet wiederum ist mit dem tropischen La-Niña-Phänomen (dem Gegenstück zu El Niño) verknüpft. So haben gravimetrische Verfahren und GRACE-Daten erstmals ermöglicht, Effekte von atmosphärischen „Telekonnektionen“, die das Klima der Tropen sogar mit entlegenen Regionen wie der Antarktis verbinden, zu quantifizieren.

GRACE-Daten offenbaren auch den Massenverlust von Inlandsgletschern in vielen Bergregionen. Dieser geht oft einher mit einer Gefährdung der Wasserversorgung der vorgelagerten Gebiete. So hat ein internationales Team von Forschenden unter der Leitung des GFZ (Farinotti et al., 2015) anhand von GRACE-Daten abge-

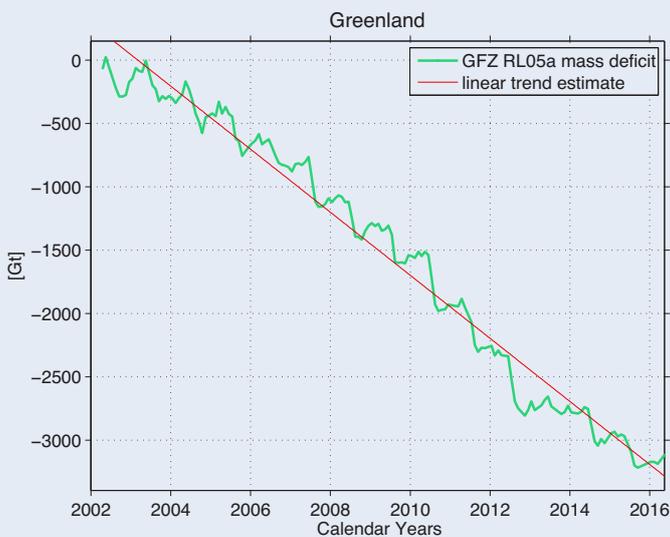


Abb. 1: Eismassenverluste in Grönland 2002 bis 2016 nach Abzug eines Modells zur Korrektur des postglazialen Ausgleichs. Der lineare Trend über die gesamte GRACE-Beobachtungsperiode beträgt etwa -232 Gt pro Jahr. Deutlich erkennbar ist, dass a) der Trend sich in den letzten Jahren deutlich vergrößert hat und b) es im Sommer 2012 zu extremer Eisschmelze gekommen ist.

Fig. 1: Ice mass loss in Greenland from 2002 to 2016 where a model-based correction for post-glacial rebound was applied. The linear trend over the entire GRACE observation period amounts to approximately -232 gigatonnes per year. The graph clearly shows that: a) the trend has significantly increased in recent years; and b) extreme ice melting occurred in the summer of 2012.

schätzt, dass das Tian-Shan-Gebirge in Zentralasien derzeit jährlich doppelt so viel Eis verliert wie ganz Deutschland an Wasser pro Jahr verbraucht.

Ozeandynamik

Die globale Erwärmung bewirkt, dass sich das Meerwasser ausdehnt. Hinzu kommen die erhöhten Zuflüsse aus den Gletscherregionen und Eisschilden der Erde. Beides trägt zum Anstieg der Meeresspiegel weltweit bei. Zwar gibt es seit 1992 hochpräzise Meeresspiegelmessungen z. B. über die US-französische Topex-Poseidon- und die nachfolgenden Jason-Missionen, aber diese zeigen nur die gesamten Höhenänderungen der Meeresoberfläche an.

Über die Massenverteilung des Wassers können die unterschiedlichen Einflüsse der (temperaturbedingten) Ausdehnung des Wassers, des schmelzenden Eises oder des Zuflusses von Land auf diese Höhenänderungen berechnet werden. Am GFZ wurde dies mit Hilfe von GRACE-Daten exemplarisch für den antarktischen Zirkumpolarstrom durchgeführt (*Bergmann-Wolf und Dobslaw, 2012*). Dabei gelang es, Schwankungen in Zeiträumen von weniger als einem Monat zu dokumentieren. Dies ermöglichte einen weit genaueren und doch großräumigen Blick auf die Dynamik der weltweit stärksten Meeresströmung, als bisherige Messungen vor Ort ergeben hatten.

Änderungen der festen Erde

Als Reaktion auf die Veränderung der Masse des oberflächennahen Wassers bewegt sich der zähflüssige Erdmantel unter der Erdkruste, wenn auch nur sehr wenig. Forscherinnen und Forscher des Projektpartners JPL haben Daten von GRACE genutzt, um zu ermitteln, wie nicht nur der Verlust der Eisschilde, sondern auch der Schwund des Grundwassers die Erdrotation verändert hat, weil sich das Gesamtsystem diesen Massenbewegungen anpasst (*Adhikari und Ivins, 2016*).

Atmosphärenbeobachtung

Das zweite wissenschaftliche Ziel der GRACE-Mission ist es, unter Nutzung der GPS-Radiookkultationstechnik (RO) täglich über 150 sehr präzise weltweit verteilte vertikale Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile zu ermitteln. Diese Messungen sind von großem Interesse für Wetterdienste und Studien zum Klimawandel. Daher stellt das GFZ diese Profile spätestens zwei Stunden nach Messung durch einen der GRACE-Satelliten den führenden Wetterzentren der Welt, wie z. B. dem ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts), NCEP (National Centers for Environmental Predictions) oder dem DWD (Deutscher Wetterdienst) permanent bereit, um deren globale Vorhersagen zu verbessern (*Wickert et al., 2009 und 2017*).

Die Nachfolgemission GRACE-FO

Mit mehr als 15 Jahren hat GRACE dreimal so lange wie ursprünglich geplant Daten geliefert. Dies unterstreicht einerseits die hervorragende Arbeit von Airbus Defense & Space (D&S) GmbH,

die die beiden Satelliten im Auftrag von NASA/JPL in Deutschland gebaut haben. Andererseits hat das Betriebsteam, bestehend aus DLR/GSOC (German Space Operations Center), JPL, UTCSR (University of Texas, Center for Space Research), Airbus D&S und GFZ, das gemeinsam den täglichen Zustand der Satelliten und ihrer Instrumente überwacht, viel unternommen, um die Missionsdauer zu verlängern. Trotzdem ist die Lebenszeit der Mission definitiv beendet, da das Satellitenduo seine Treibstoffvorräte aufgebraucht hat. Einer der Satelliten wurde bereits am 24. Dezember 2017 kontrolliert zum Absturz gebracht, der andere folgt im März 2018.

Da, wie oben geschildert, die aus GRACE-Daten abgeleiteten Erkenntnisse Massentransporten einerseits von enormem Nutzen für die Untersuchung vieler klimarelevanter Phänomene sind, andererseits aber nur durch lange Zeitreihen (möglichst über mehrerer Dekaden) die notwendige Zuverlässigkeit in den Schlussfolgerungen erreicht werden kann, haben NASA und GFZ bereits 2011 beschlossen, eine Nachfolgemission GRACE Follow-On (GRACE-FO) zu realisieren. Wie bei GRACE wurden die Satelliten wieder im Auftrag von NASA/JPL durch Airbus D&S gebaut. Die notwendigen Umwelttests (Thermal-Vakuum, Akustik, Vibration, elektromagnetische Kompatibilität) wurden bei der IABG (Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft) in Ottobrunn erfolgreich abgeschlossen (Abb. 2). Das JPL hat wiederum die Instrumente beigelegt. Ausnahmen sind ein Laser-Retroreflektor, der wie bei GRACE durch das GFZ beigelegt wird und zur von GPS unabhängigen Satellitenbahnbestimmung dient. Daneben wird GRACE-FO ein neuartiges Laser-Ranging-Interferometer (LRI) als Demonstrationsnutzlast für zukünftige Schwerfeldmissionen fliegen. Das LRI (Abb. 3) ist eine deutsch-amerikanische Entwicklung, mit der die Distanzänderung zwischen den beiden Satelliten gegenüber der Mikrowellenbeobachtung etwa dreißig- bis vierzigmal genauer beobachtet werden kann (*Sheard et al., 2012*). Damit wird die



Abb. 2: GRACE-FO-Satellit 1 während des Thermal-Vakuumtests bei der IABG (Airbus Defence and Space GmbH)

Fig. 2: GRACE-FO satellite 1 during thermal-vacuum tests at IABG

Messgenauigkeit im Bereich von 80 nm oder in etwa dem doppelten Durchmesser eines Hepatitis-B-Virus liegen – und dies über einen Abstand, der dem zwischen Potsdam und Hannover entspricht.

Der Missionsbetrieb von GRACE-FO wird durch Eigenanteile des GFZ finanziert und wie bei GRACE durch DLR/GSOC realisiert. Neu ist, dass die Satellitenempfangsstation des GFZ in Ny-Ålesund auf Spitzbergen (Abb. 4) als primäre Empfangsstation dienen wird. Dies hat den Vorteil, dass bei jedem Umlauf der Satelliten Kontakt zum Boden besteht und der Zustand der Satelliten damit wesentlich häufiger als bei GRACE kontrolliert werden kann. Die im Routinebetrieb von DLR/GSOC eingesetzten Stationen Weilheim und Neustrelitz haben dagegen nur etwa alle elf Stunden Kontakt zu GRACE-FO, was bei eventuellen technischen Problemen auf den Satelliten von Nachteil sein kann.

Das GFZ ist zudem für die Bereitstellung der Startrakete verantwortlich. Ursprünglich war dazu eine Dnepr-Rakete mit Startplatz Baikonur (Kasachstan) und Startdatum August 2017 vorgesehen. Durch die Russland-Ukraine-Krise konnte dieses Projekt aber nicht zu Ende geführt werden. Daher wurde Ende 2016 auf eine US-amerikanische Falcon-9 von SpaceX mit Startplatz Vandenberg Air Force Base in Kalifornien gewechselt. Das dazugehörige Management der Startdienstleistungen und der Bau eines „Multi Satellite Dispensers“ werden im Auftrag des GFZ von Airbus D&S durchgeführt.

Es ist geplant, dass GRACE-FO im Frühjahr 2018 gestartet wird. Es ist von zentraler Bedeutung, die forschungsrelevanten GRACE-Zeitreihen schnellstmöglich zu verlängern und daraus weitere Erkenntnisse abzuleiten.

Die Zukunft

Ein wesentlicher Nachteil des GRACE-Konzepts ist, dass lediglich ein Satellitenpaar auf einem Orbit mit einer sehr hohen Bahnneigung von 89° geflogen wird. Dadurch wird von GRACE und später von GRACE-FO die Variation des Schwerefeldsignals im Wesentlichen nur in Flugrichtung auf Bahnen vom Nordpol zum Südpol beobachtet. Durch diese ungleichförmige Abtastung des Erdschwerefelds (Anisotropie) kommt es zu „Streifen“ in den abgeleiteten Karten. Diese Störungen lassen sich zwar durch eine Nachbehandlung korrigieren, wobei aber gleichzeitig zusätzliche Fehler produziert werden. Das GRACE-Konzept macht es daher trotz LRI auf GRACE-FO unmöglich, die räumliche und zeitliche Auflösung wesentlich zu verbessern (Flechtner et al., 2016).

Dies wird erst durch sogenannte Next Generation Gravity Missions (NGGM) möglich sein. Um die Anisotropie zu überwinden, wird vorgeschlagen, neben dem die Polarregionen überfliegenden Satellitenpaar ein weiteres Paar in nur etwa 70° Inklination einzuschleusen. Beide Satellitenpaare könnten mit einem auf GRACE-FO erprobten LRI ausgerüstet sein. Diese sogenannte „Bender-Konstellation“ wurde bereits in Simulationen untersucht (Elsaka et al., 2014). Es zeigte sich, dass die Kombination der Messdaten

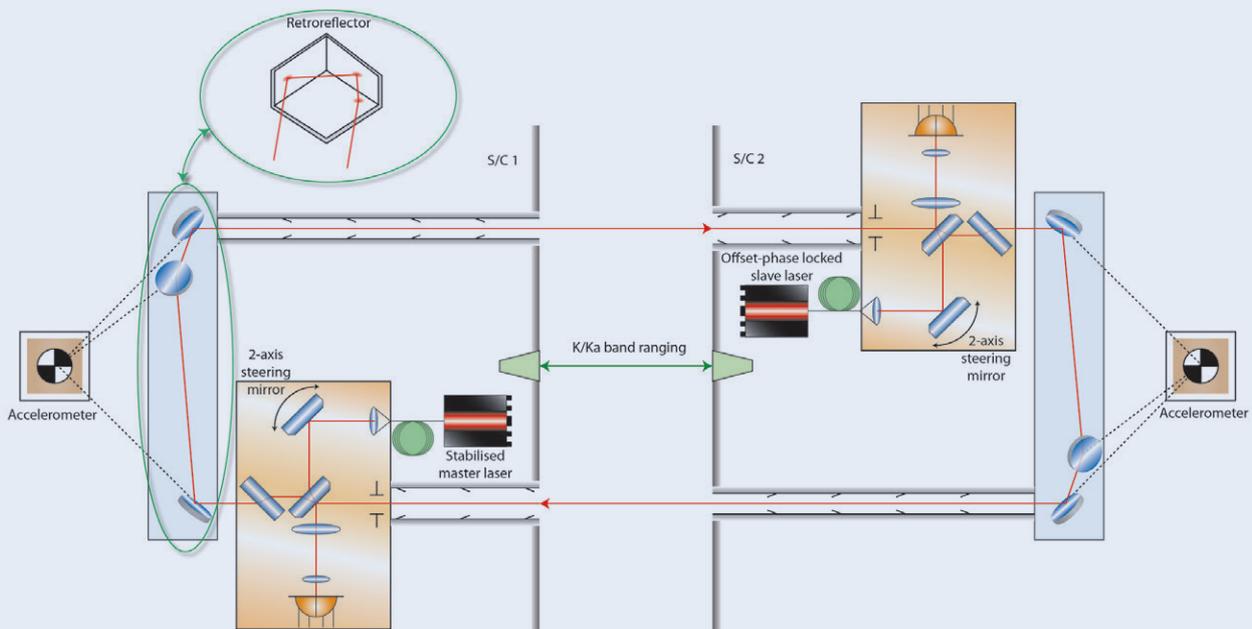


Abb. 3: Schematischer Aufbau des GRACE-FO Laser-Ranging-Interferometers (Grafik: Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut Hannover))

Fig. 3: Schematic design of the GRACE-FO laser ranging interferometer



Abb. 4 Die Satellitenempfangsstation Ny-Ålesund mit ihren beiden Antennen (Foto: C. Falck, GFZ)

Fig. 4: The satellite receiving station Ny-Ålesund with its two antennas

dieser beiden Satellitenpaare bei Verwendung eines wesentlich tieferen Orbits von etwa 320 km die Genauigkeit der Schwerefeldmodelle um einen Faktor 10 verbessern und gleichzeitig die räumlichen Auflösung von 400 km auf 150 km steigern könnte. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die verbesserte Beobachtung der nicht gravitativen Störbeschleunigungen, die auf den Satelliten einwirken. Diese sind nicht vom Schwerefeld, sondern hauptsächlich durch den (auch in 300 bis 500 km Flughöhe noch vorhandenen) Luftwiderstand und den Strahlungsdruck der Sonne bedingt. Bei GRACE und GRACE-FO werden diese mit einem hochpräzisen Beschleunigungsmesser direkt erfasst. Daneben leistet das GFZ einen Beitrag zur Verbesserung der Modelle zur Korrektur von hochfrequenten Massenvariationen in der Atmosphäre und im Ozean (Dobslaw *et al.*, 2017).

Die nominelle Lebensdauer von GRACE-FO wird wie bei GRACE wieder fünf Jahre betragen. Die sehr guten Erfolge bei GRACE lassen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler natürlich bereits jetzt auch von einigen zusätzlichen Lebensjahren träumen. Die Zeitreihen von Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs wären dann mindestens 20 Jahre, im günstigsten Fall 30 Jahre lang. Damit könnten die eingangs diskutierten Fragen im Zusammenhang mit der wichtigen gesellschaftlichen Herausforderung der Erhaltung unserer Lebensräume wesentlich besser und zuverlässiger als heute beantwortet werden.

Literatur

- Adhikari, S., Ivins, E. R. (2016): Climate-driven polar motion: 2003-2015. - *Science Advances*, 2, 4, e1501693. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501693>
- Bergmann-Wolf [Bergmann], I., Dobslaw, H. (2012): Short-term transport variability of the Antarctic circumpolar current from satellite gravity observations. - *Journal of Geophysical Research*, 117, C05044. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JC007872>
- 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, pp. 716–722. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2513>
- Dobslaw, H., Bergmann-Wolf, I., Dill, R., Poropat, L., Thomas, M., Dahle, C., Esselborn, S., König, R., Flechtner, F. (2017): A new high-resolution model of non-tidal atmosphere and ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RLo6. - *Geophysical Journal International*, 211, 1, pp. 263–269. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx302>
- Elsaka, B., Raimondo, J.-C., Brieden, P., Reubelt, T., Kusche, J., Flechtner, F., Iran Pour, S., Sneeuw, N., Müller, J. (2014): Comparing seven candidate mission configurations for temporal gravity field retrieval through full-scale numerical simulation. - *Journal of Geodesy*, 88, pp. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0665-9>
- Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., Güntner, A. (2016): What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? - *Surveys in Geophysics*, 37, 2, pp. 453–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>
- Gouweleew, B., Kvas, A., Gruber, C., Gain, A. K., Mayer-Gürr, T., Flechtner, F., Güntner, A. (2017 online): Daily GRACE gravity field solutions track major flood events in the Ganges-Brahmaputra Delta. - *Hydrology and Earth System Sciences Discussion: HESSD*, pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-2016-653>
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M.-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S., Rodell, M. (2015): Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. - *Water Resources Research*, 51, 7, pp. 5217–5238. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>
- Sasgen, I., Dobslaw, H., Martinec, Z., Thomas, M. (2010): Satellite gravimetry observation of Antarctic snow accumulation related to ENSO. - *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 3-4, pp. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.015>
- Sheard, B. S., Heinzel, G., Danzmann, K., Shaddock, D. A., Klipstein, W. M., Folkner, W. M. (2012): Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission. - *Journal of Geodesy*, 86, pp. 1083–1095. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0566-3>
- Wickert, J., Dick, G., Ge, M., Schmidt, T., Semmling, M., Alshawaf, F., Arras, C., Asgarimehr, M., Babeyko, A., Deng, Z., Heise, S., Klotz, J., Li, X., Lu, C., Männel, B., Ramatschi, M., Simeonov, T., Vey, S., Zus, F., Schuh, H. (2017): Erdbeobachtung mit Navigationssatelliten. – *System Erde*, 7, 2, pp. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.07.02.4>
- Wickert, J., Michalak, G., Schmidt, T., Beyerle, G., Cheng, C. Z., Healy, S. B., Heise, S., Huang, C. Y., Jakowski, N., Köhler, W., Mayer, C., Offiler, D., Ozawa, E., Pavelyev, A. G., Rothacher, M., Tapley, B., Arras, C. (2009): GPS radio occultation: results from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. - *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20, 1, pp. 35–50. DOI: [https://doi.org/10.3319/TAO.2007.12.26.01\(F3C\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2007.12.26.01(F3C))

Ozeanographische Anwendungen der GRACE-Mission

Henryk Dobslaw, Saskia Esselborn, Maik Thomas
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

From 15 years of time-variable gravity fields of the GRACE mission, the mass-induced part of the global mean sea-level rise is estimated to be 1.5 mm/a, superimposed with large seasonal and also interannual variations as a consequence of climate change and anthropogenic use of continental water resources. Circulation-induced bottom pressure anomalies additionally observed by GRACE are found to be in line with predictions from ocean general circulation models and are related to large-scale variations in ocean transport in response to shifts in the surface wind regimes.



Die verschiedenen Sensoren an Bord der Satelliten-Schwerfeldmission GRACE ermöglichen seit dem Start im Jahr 2002 die Bestimmung eines jeweils neuen, hochauflösenden globalen Erdschwerfeldmodells aus den Daten eines einzelnen Monats. Der Vergleich einzelner Monate dieser mittlerweile mehr als 15 Jahre überdeckenden Zeitreihe eröffnet den Blick auf Massenvariationen im System Erde, die über den Ozeanen in allererster Linie durch Änderungen des relativen Meeresspiegels entstehen. Deren Verständnis und eine daraus idealerweise folgende Vorhersagbarkeit sind von hoher Relevanz für die Raumplanung in oftmals extrem dicht besiedelten Küstenregionen.

Im Folgenden werden die wichtigsten dynamischen Ursachen für die beobachteten zeitlichen Änderungen des Schwerfelds über den Ozeanen beleuchtet und beispielhaft insbesondere die wichtigsten Erkenntnisse aus GRACE-Beobachtungen für ozeanographische Anwendungen diskutiert. Zur Illustration der Ergebnisse wird die aktuelle Reprozessierung RLo5a der GRACE-Zeitreihe vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ verwendet (<http://gravis.gfz-potsdam.de>).

Dynamik der festen Erde und relative Meeresspiegeländerungen

Die Höhe des Meeresspiegels an einer Küste wird von einer Vielzahl ganz unterschiedlicher Prozesse beeinflusst. Neben Änderungen der in den Ozeanen gespeicherten Gesamtwassermenge und deren Dichteverteilung bewirken auch tektonische, sedimentologische oder thermische Phänomene an der Erdoberfläche und im Erdinnern absolute Höhenänderungen von Küstenbereichen, die – sofern es sich um Absenkungen handelt – als relativer Anstieg des Meeresspiegels wahrgenommen werden. Gleichzeitig bewirken die mit diesen Prozessen in Verbindung stehenden Umschichtungen von insbesondere Krusten- und Mantelmaterial auch kleine Änderungen im Erdschwerfeld: da sich der globale Meeresspiegel langfristig immer entlang einer Fläche konstanten Erdschwerepotenzials – dem Geoid – ausrichtet, die punktuell

Links: Mit Hilfe der Sensordaten der Satellitenmission GRACE können zeitliche Änderungen der Massenverteilung im Ozean aufgrund von atmosphärischen und hydrosphärischen Energie- und Impulsflüssen beobachtet werden. (Illustration: Astrium/GFZ)

Left: With the help of the sensor data of the satellite mission GRACE, temporal changes in the mass distribution in the ocean due to atmospheric and hydrosphere energy and momentum fluxes are observed.



Kontakt: Henryk Dobslaw
(dobslaw@gfz-potsdam.de)

um bis zu 120 m vom bestangepassten Rotationsellipsoid abweicht, kann sich auch dieser Prozess lokal als Änderung des relativen Meeresspiegels manifestieren. Ein besonders wichtiger geodynamischer Prozess für den relativen Meeresspiegel ist die glazialisostatische Anpassung (GIA), welche die Reaktion der festen Erde auf die Vereisungszyklen der letzten Millionen Jahre beschreibt. Diese schließt auch Deformationen durch die in der heutigen Zeit wieder stärker abschmelzenden Gletscher mit ein (Klemann und Martinec, 2011).

Masseninduzierte Meeresspiegeländerungen

Die Gesamtmenge des Wassers im Weltozean ändert sich ständig aufgrund von Unterschieden zwischen den globalen Summen des Niederschlags, der Verdunstung und der kontinentalen Abflüsse über die Flusssysteme. Insbesondere Veränderungen in der Massenbilanz der großen Eisschilde der Antarktis und Grönlands tragen gegenwärtig zum Anstieg des mittleren Meeresspiegels bei (Sasgen et al., 2010). Von Bedeutung sind aber auch langfristige Änderungen des in Boden und Aquiferen gespeicherten Wassers aufgrund von natürlicher Variabilität, langfristigen Klimaänderungen oder anthropogener Übernutzung zur Deckung des Wasserbedarfs der Landwirtschaft.

Mit Hilfe der Zeitreihe monatlicher Erdschwerfelder der GRACE-Mission können die masseninduzierten Variationen des globalen Meeresspiegels quantifiziert werden (Bergmann-Wolf et al., 2014). Die Zeitreihe wird dominiert von saisonalen Variationen mit einer Amplitude von etwa 10 mm und einem langfristigen Anstieg von etwa 1,5 mm pro Jahr (Abb. 1). Eine ergänzende Tiefpassfilterung mit einem gleitenden Mittel über zwölf Monate offenbart niederfrequente Fluktuationen des Meeresspiegels, die in einzelnen Jahren auch zu einem Absinken im Vergleich zum Vorjahr führen können. Diese zwischenjährlichen Schwankungen stehen in engem Zusammenhang mit natürlichen Variationen des Klimasystems. In diesem Fall sind es insbesondere Verschiebungen der oberflächennahen Windsysteme und damit Änderungen der Menge der Niederschläge in einzelnen Festlandsregionen, deren geomorphologische und hydrogeologische Eigenschaften die Geschwindigkeiten der kontinentalen Abflüsse bestimmen.

Masseninduzierte Meeresspiegeländerungen sind nur in erster Näherung global homogen. Änderungen in den kontinental gespeicherten Wassermassen bewirken genauso wie Massenverschiebungen in der festen Erde lokale Höhenänderungen der Niveaulächen des Erdschwerfelds. Diese führen konsequenterweise zu einer entsprechenden Anpassung des Meeresspiegels, wobei auch Sekundäreffekte – z. B. die durch die Änderung des Massenträgheitsmoments der Erde erzwungene Verlagerung des Rotationspols der Erde – zu beachten sind. Zusätzlich sind auch die deutlich kleineren Selbstanziehungseffekte der ozeanischen Wassermassen auf die ozeanische Dynamik zu berücksichtigen (Kuhlmann et al., 2011).

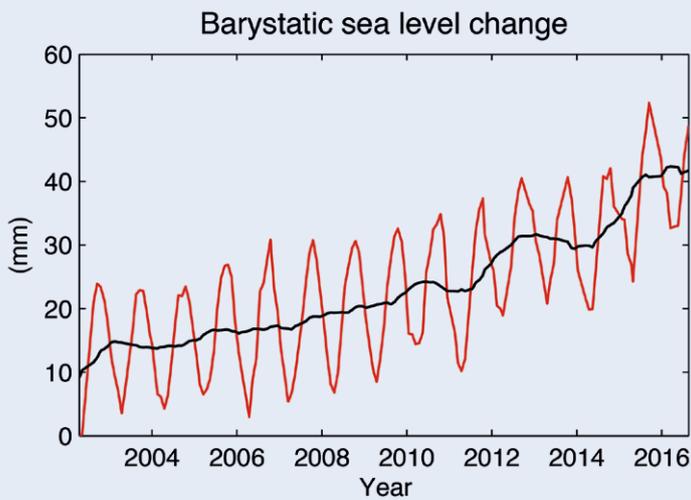


Abb. 1: Variationen des masseninduzierten Anteils des globalen Meeresspiegels basierend auf GFZ-RLO5a-Monatslösungen (April 2002 bis August 2016) der GRACE-Mission (rot) und zusätzlich nach einer Tiefpassfilterung (gleitendes Mittel über zwölf Monate) zur Unterdrückung der saisonalen Variationen (schwarz) (basierend auf Bergmann-Wolf et al., 2014).

Fig. 1: Time variations of the mass-induced contributions to global sea-level change based on GFZ RLO5a monthly gravity field solutions (April 2002 - August 2016) from the GRACE mission (red), and additionally filtered with a 12 months running average filter to suppress seasonal variations (black) (based on Bergmann-Wolf et al., 2014).

Trotz der hohen Genauigkeit von GRACE ist die Identifikation eines langfristig gültigen und damit potenziell extrapolationsfähigen Trends oder gar eines Beschleunigungsterms im Meeresspiegelanstieg aus der gegenwärtig vorliegenden GRACE-Zeitreihe nur mit verhältnismäßig großen Unsicherheiten möglich: aktuelle Schätzungen liegen bei Restfehlern von etwa 0,3 mm pro Jahr im mittleren Anstieg. Die lückenlose Fortsetzung der Beobachtungen mit der für den Frühling 2018 geplanten Nachfolge-mission GRACE-FO und die so entstehende längere Zeitreihe wird diese Unsicherheiten perspektivisch aber weiter verringern (Flechtner et al., 2016).

Zirkulationsinduzierte ozeanische Massenverlagerungen

Unabhängig von Veränderungen in der Gesamtmasse und der Höhe des Geoids werden Wassermassen durch die allgemeine ozeanische Zirkulation regional umverteilt. Dabei etablieren externe Schubspannungen durch die Wirkung der oberflächennahen Winde sowie dreidimensionale räumliche Dichtegradienten im Meerwasser Druckdifferenzen, die entsprechende Ausgleichsströmungen auslösen. Aufgrund ihrer relativ kleinen Geschwindigkeiten sind diese stark von der Wirkung von Corioliskräften beeinflusst. Diese sogenannte windgetriebene und thermohaline Zirkulation führt zur Entstehung der bekannten großräumigen Strömungssysteme im Weltozean, welche maßgeblich für den Transport von Wärme in gemäßigte und polare Breiten verantwortlich sind und deren prominentestes Element der Golfstrom im Nordatlantik ist.

Die allgemeine Zirkulation im Weltozean kann mit numerischen Modellen simuliert werden, die üblicherweise auf aus der Navier-Stokes-Gleichung abgeleiteten, nichtlinearen Impulserhaltungsgleichungen, der Kontinuitätsgleichung für inkompressible Flüssigkeiten sowie den Erhaltungsgleichungen für Wärme und Salz basieren (Thomas et al., 2001). Derartige Modelle können zur Simulation des mit GRACE beobachtbaren ozeanischen Bodendruckfelds herangezogen werden; aktuelle Simulationsergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen mit entsprechenden GRACE-Beobachtungen (Dobslaw und Thomas, 2007). Signalstärken von mehreren hPa finden sich zum einen in zahlreichen Küstenregionen, wo insbesondere in Flachwasserregionen im Schelfbereich große Bodendrucksignale durch gelegentlichen Windstau an der Küste induziert werden (Abb. 2).

Daneben finden sich auch im offenen Ozean etliche Gebiete, in welchen oberflächennahe Windsysteme räumliche Gradienten in der Meeresoberflächennähe induzieren. Gemäß dem Taylor-Proudman-Theorem übertragen sich derartige oberflächennahe Druckgradienten unmittelbar bis auf den Ozeanboden, solange die vertikale Dichteverteilung in der Wassersäule hinreichend homogen ist. Während diese Voraussetzung im tropischen Ozean durch die Existenz einer thermischen Sprungschicht in einigen 100 m Tiefe nicht gegeben ist, wird insbesondere der Südozean durch die vorherrschenden starken Winde intensiv durchmischt. Dabei können bei günstiger Geometrie des Ozeanbodens resonante Moden im Bodendruck entstehen, die über große Regionen kohärent und daher mit hoher Genauigkeit durch GRACE beobachtbar sind. Die grundsätzliche Übereinstimmung von Modellsimulationen und Beobachtungsdaten führte in jüngerer Zeit zu zahlreichen Datenassimilationsexperimenten (Saynisch et al., 2015), um über die Synthese von Beobachtungsdaten und theoretischem Wissen über die Fluidynamik eine genauere Vorstellung der vorherrschenden Prozesse im Ozean zu entwickeln.

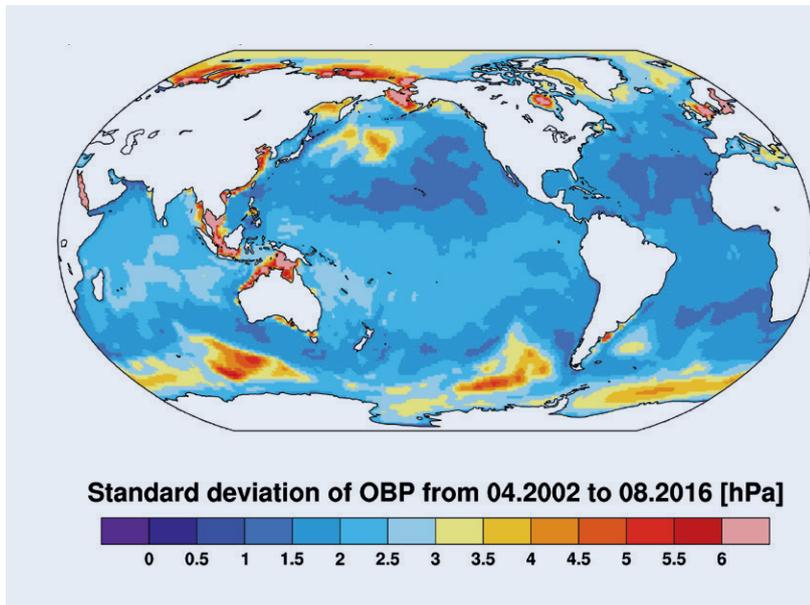


Abb. 2: Variabilität des Ozeanbodendrucks (OBP) basierend auf GFZ-RL05a-Monatslösungen (April 2002 bis August 2016) der GRACE-Mission aufgrund von interner Ozeandynamik wie wind- oder thermohalin getriebener allgemeiner Ozeanzirkulation (nach Dobsław und Thomas, 2007)

Fig. 2: Ocean bottom pressure (OBP) variability obtained from GFZ RL05a monthly gravity fields of the GRACE mission due to internal ocean dynamics as the wind-driven or the thermo-haline circulation (updated from Dobsław and Thomas, 2007)

Transportvariationen des Antarktischen Zirkumpolarstroms

Neben der Assimilation von GRACE-Beobachtungen in ein numerisches Ozeanmodell lassen sich die abgeleiteten zirkulationsinduzierten Bodendruckvariationen auch als Indikator für die vorherrschende Dynamik in ausgewählten Regionen der Erde verwenden. So war es bereits mit wenigen Jahren GRACE-Beobachtungen möglich, aus meridionalen Druckgradienten im südlichen Pazifik die zeitlichen Variationen im zonalen Transport des Antarktischen Zirkumpolarstroms zu schätzen und den kausalen Zusammenhang mit den vorherrschenden Windverhältnissen in den gemäßigten Breiten der südlichen Hemisphäre zu belegen (Abb. 3). Dabei wurden gute Korrelationen mit Meeresspiegelbeobachtungen auf der Antarktischen Halbinsel festgestellt. Zugleich konnte gezeigt werden, dass GRACE insbesondere in hohen Breiten auch auf Perioden von wenigen Wochen bis hinunter zu Tagen geophysikalisch relevante Informationen liefern kann (Bergmann und Dobsław, 2012).

Die entwickelten Konzepte lassen sich grundsätzlich auch auf andere Weltregionen übertragen. So konnte beispielsweise auch für den Nordpazifik die Entstehung der dortigen Bodendruckvariationen mit nur wenigen dominanten Moden der großräumigen Windverhältnisse in der Region erklärt werden (Petrick *et al.*, 2014). Derartige Studien gewinnen insbesondere Bedeutung mit Blick auf die Tatsache, dass auch zeitliche Variationen der westlichen Randströme wie der Golfstrom im Nordatlantik Bodendrucksignale hervorrufen. Diese müssen aber zunächst von den deutlich stärkeren, windgetriebenen Signalen getrennt werden, ehe sie zur satellitengestützten Überwachung dieses für die klimatischen Verhältnisse in Europa außerordentlich wichtigen Strömungssystems herangezogen werden können.

Schlußfolgerungen

Die Satellitenmission GRACE liefert als einziges gegenwärtig bekanntes Fernerkundungsverfahren quantitative Abschätzungen von Massenverlagerungen im System Erde. Damit ist es erstmals möglich, verschiedene Beiträge zu relativen Meeresspiegeländerungen auf globalen Skalen messtechnisch zu erfassen und unter Nutzung ergänzender Datenquellen und numerischer Modelldaten in verschiedene Einzelbeiträge zu separieren. In der Kombination mit Beobachtungen von Satellitenaltimetrie (siehe Infobox, Seite 23) und Küstenpegeln konnten somit in der vergangenen Dekade die Unsicherheiten im globalen Meeresspiegelbudget deutlich reduziert werden. Basierend auf den GRACE-Ergebnissen können aktuelle Prognosemodelle für mittel- und langfristige Meeresspiegelvariationen detailliert in ihren Einzelkomponenten validiert werden.

Gleichzeitig ist die räumliche Auflösung der GRACE-Mission aber noch ein limitierender Faktor für viele ozeanographische Anwendungen. Mit der kurz vor dem Start befindlichen Mission GRACE-FO und der erstmals realisierten laserbasierten Abstandsmessung zwischen beiden Satelliten sollten hierfür erste Verbesserungen erzielt werden können. Ein Durchbruch für die Quantifizierung zirkulationsinduzierter Bodendrucksignale bis hin zur Überwachung der meridionalen Umwälzzirkulation mit gravimetrischen Verfahren kann allerdings erst von einer Schwerefeldmission der nächsten Generation erwartet werden, für die nach gegenwärtigem Stand des Wissens mindestens zwei Satellitenpaare auf unterschiedlich inklinierten Orbits in einer nochmals deutlich reduzierten Bahnhöhe erforderlich sein werden.

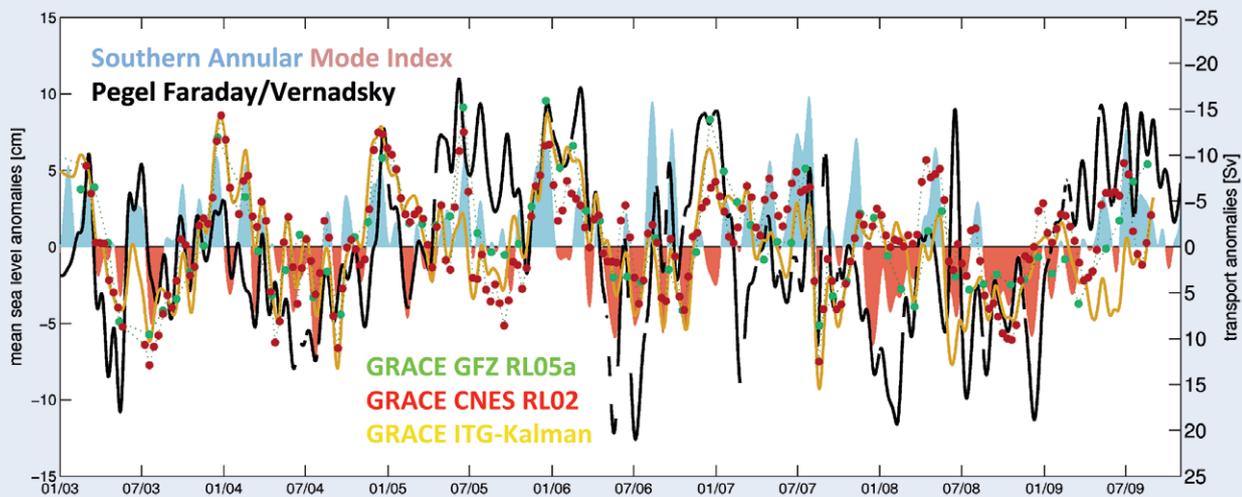


Abb. 3: Transportvariationen des Antarktischen Zirkumpolarstroms abgeleitet aus verschiedenen Zeitreihen von GRACE-Schwerefeldern: GFZ-RL05a (grüne Punkte), CNES-RL02 (rote Punkte), ITG-Kalman (gelbe Linie). Gegenübergestellt sind mit diesen Transportvariationen eng korrelierte Meeresspiegelvariationen am Pegel Faraday/Vernadsky an der Küste der Antarktischen Halbinsel (schwarze Linie), sowie ein auf globalen Wettermodelldaten basierender Index für die Windverhältnisse der mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre (hellblau/hellrot); weitere Einzelheiten in Bergmann und Dobslaw (2012)

Fig. 3: Variations in ocean transport of the Antarctic Circumpolar Current as derived from different time-series of GRACE gravity fields: GFZ RL05a (green dots), CNES RL02 (red dots), ITG-Kalman (yellow line). High correlations are found between those transport variations and local sea-level variations as observed at tide gauge Faraday/Vernadsky located at the coast of the Antarctic Peninsula (black line) as well as with an index for the Southern Annular Mode based on a global numerical weather prediction model that is characterizing the hemispheric wind pattern in moderate latitudes of the Southern Hemisphere. Further details are given in Bergmann and Dobslaw (2012).

Literatur

- Bergmann-Wolf, I., Zhang, L., Dobslaw, H. (2014): Global eustatic sea-level variations for the approximation of geocenter motion from Grace. - *Journal of Geodetic Science*, 4, 1, pp. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.2478/jogs-2014-0006>
- Bergmann-Wolf [Bergmann], I., Dobslaw, H. (2012): Short-term transport variability of the Antarctic circumpolar current from satellite gravity observations. - *Journal of Geophysical Research*, 117, C05044. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JCo07872>
- Dobslaw, H., Thomas, M. (2007): Simulation and observation of global ocean mass anomalies. - *Journal of Geophysical Research*, 112, C5, C05040. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JC004035>
- Esselborn, S., Rudenko, S., Schöne, T. (2017 online): Orbit related sea level errors for TOPEX altimetry at seasonal to decadal time scales. - *Ocean Science Discussion*. DOI: <https://doi.org/10.5194/os-2017-51>
- Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., Güntner, A. (2016): What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? - *Surveys in Geophysics*, 37, 2, pp. 453–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>
- Klemann, V., Martinec, Z. (2011): Contribution of glacial-isostatic adjustment to the geocenter motion. - *Tectonophysics*, 511, 3-4, pp. 99–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.08.031>
- Kuhlmann, J., Dobslaw, H., Thomas, M. (2011): Improved modeling of sea level patterns by incorporating self-attraction and loading. - *Journal of Geophysical Research*, 116, C11036. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JC007399>
- Petrick, C., Dobslaw, H., Bergmann, I., Schön, N., Matthes, K., Thomas, M. (2014): Low-frequency ocean bottom pressure variations in the North Pacific in response to time-variable surface winds. - *Journal of Geophysical Research*, 119, 8, pp. 5190–5202. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JC009635>
- Rudenko, S., Neumayer, K., Dettmering, D., Esselborn, S., Schöne, T., Raimondo, J.-C. (2017): Improvements in precise orbits of altimetry satellites and their impact on mean sea level monitoring. - *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55, 6, pp. 3382–3395. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2670061>

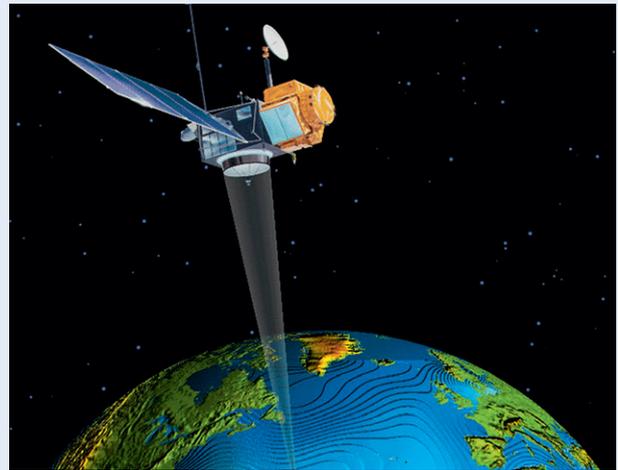
Satellitaltimetrie

Seit 1991 vermessen Altimetersatelliten die Höhe der Meeresoberfläche im offenen Ozean. Aus Flughöhen von bis zu 1300 km werden Radarsignale zur Erde gesendet, welche von Wasser- oder Eisoberflächen reflektiert werden. Aus der Laufzeit dieser Signale kann der Abstand zwischen Satellit und Reflektionsfläche mit Zentimetergenauigkeit bestimmt werden. Besonders interessant sind hierbei die zeitlichen Änderungen des mittleren Meeresspiegels sowie großräumige Muster in den Meereshöhenvariationen, die im Zusammenhang mit langperiodischen Klimaschwankungen stehen. Im Unterschied zur GRACE-Mission werden durch die Altimetrie gleichzeitig massen- und dichteinduzierte Meeresspiegeländerungen gemessen, so dass sich beide Satellitensysteme in idealer Weise ergänzen.

Altimetrische Messungen sind im Gegensatz zu Küstenpegeldaten grundsätzlich unabhängig von vertikalen Landbewegungen und überdecken den Ozean nahezu global. Allerdings ist es eine große wissenschaftliche Herausforderung, diese Messungen über Jahrzehnte genau zu halten. Satellitenmissionen haben nur eine begrenzte Lebensdauer und beim Übergang zwischen einzelnen Missionen können Sprünge in der Zeitreihe auftreten. Auch die Identifikation von Driften, die beispielsweise durch das Altern der Satellitenelektronik auftreten können, ist von herausragender Wichtigkeit für die Langzeitstabilität des Messverfahrens.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten am GFZ liegt auf der Berechnung hochgenauer Satellitenbahnen für Missionen wie ERS-1, ERS-2, Envisat, TOPEX/Poseidon, Jason-1 oder Jason-2 (Rudenko *et al.*, 2017). Besonderes Augenmerk liegt auf dem Einfluss von

Unsicherheiten in der Bahnbestimmung auf saisonale und interannuelle Änderungen der altimetrie-basierten Meereshöhen. So konnte gezeigt werden, dass die zeitvariable Komponente des zur Bahnbestimmung herangezogenen Erdschwerefelds großräumige und lokal nicht vernachlässigbare Auswirkungen auf saisonale und dekadische Variationen des Meeresspiegels hat (Rudenko *et al.*, 2014). Besonders problematisch für die Bestimmung globaler und regionaler Meeresspiegeltrends ist die Genauigkeit der Daten der frühen Altimetermissionen aus den 1990er Jahren. Exemplarisch konnte für die TOPEX/Poseidon-Mission gezeigt werden, dass mehrjährige globale Schwankungen des Meeresspiegels systematische Effekte enthalten, die auf Unsicherheiten in der Bahnbestimmung beruhen (Esselborn *et al.*, 2017).



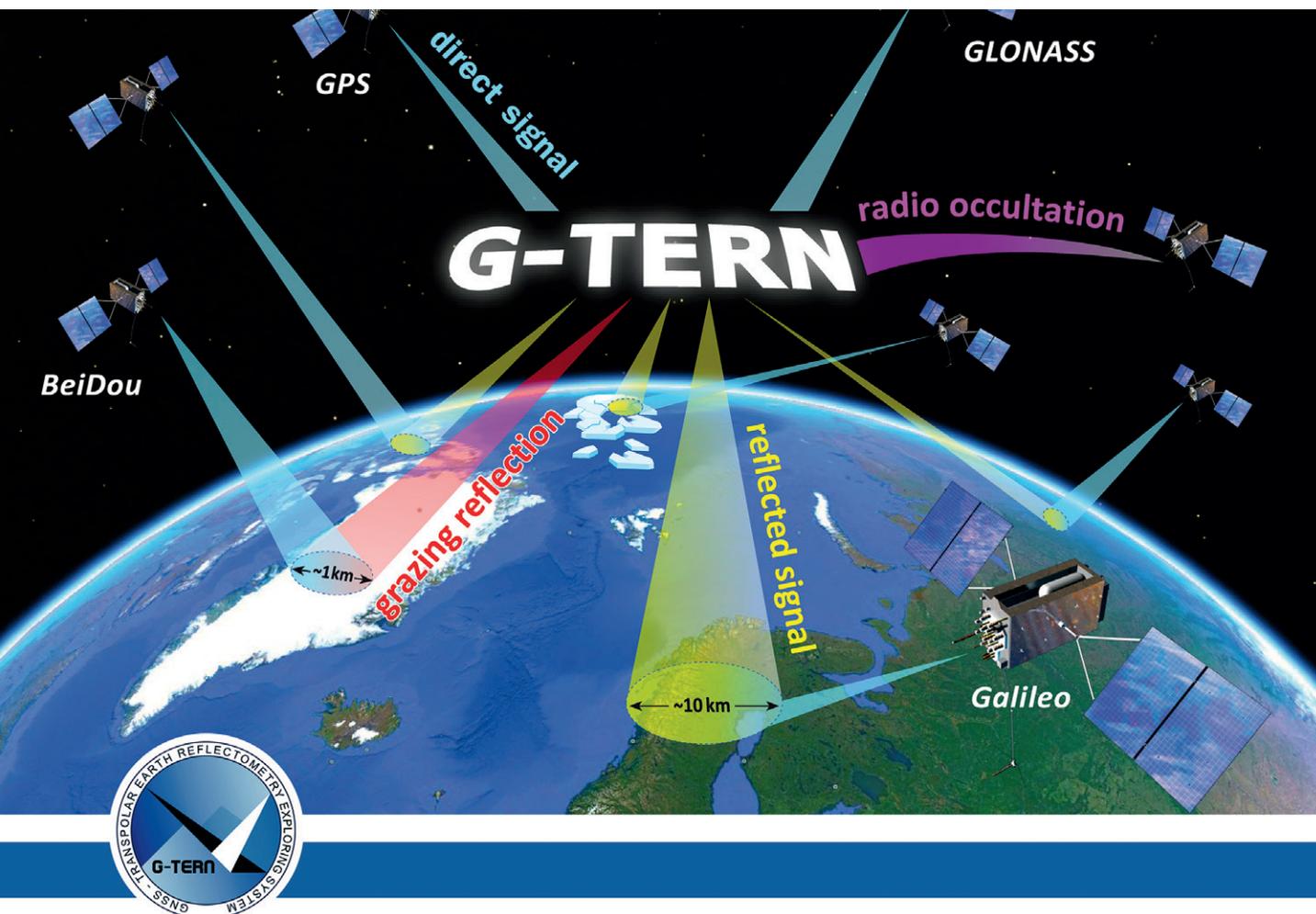
Topex/Poseidon (courtesy NASA/JPL-Caltech)

- Rudenko, S., Dettmering, D., Esselborn, S., Schöne, T., Förste, C., Lemoine, J.-M., Ablain, M., Alexandre, D., Neumayer, K.-H. (2014): Influence of time variable geopotential models on precise orbits of altimetry satellites, global and regional mean sea level trends. - *Advances in Space Research*, 54, 1, pp. 92–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.03.010>
- Sasgen, I., Dobslaw, H., Martinec, Z., Thomas, M. (2010): Satellite gravimetry observation of Antarctic snow accumulation related to ENSO. - *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 3-4, pp. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.015>
- Saynisch, J., Bergmann, I., Thomas, M. (2015): Assimilation of GRACE-derived oceanic mass distributions with a global ocean circulation model. - *Journal of Geodesy*, 89, 2, pp. 121–139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0766-0>
- Thomas, M., Sündermann, J., Maier-Reimer, E. (2001): Consideration of ocean tides in an OGCM and impacts on subseasonal to decadal polar motion excitation. – *Geophysical Research Letters*, 28, 12, pp. 2457–2460. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000GL012234>

Erdbeobachtung mit Navigationsatelliten

Jens Wickert, Galina Dick, Maorong Ge, Torsten Schmidt, Maximilian Semmling, Fadwa Alshawaf, Christina Arras, Milad Asgarimehr, Andrey Babeyko, Zhiguo Deng, Stefan Heise, Jürgen Klotz, Xingxing Li, Cuixian Lu, Benjamin Männel, Markus Ramatschi, Tzvetan Simeonov, Sibylle Vey, Florian Zus, Harald Schuh
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Along with cell phones and the internet, satellite navigation is an integral part of everyday life. However, satellite navigation signals provide much more than precise information on user locations. Even before the GPS was declared fully operational in 1995, the potential for these globally and continuously available navigation signals for Earth observation and geoscientific applications was recognized. Such applications include the precise monitoring of continental plate movements with sub-mm/year accuracy (now used in real-time as part of early earthquake warning systems), regional and global atmospheric and ionospheric sounding to improve weather forecasts and climate change predictions, and for monitoring of water, ice, and land surfaces. The Earth observation prospects and related spectrum of applications are continuously growing, mainly stimulated by the transition from a single constellation (GPS) to Multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) with the Russian GLONASS, Chinese BeiDou and European Galileo satellites and by the increasing number of GNSS receivers available both on the ground and aboard Low Earth Orbiting satellites.



Mit der Nutzung von Mobiltelefonen und dem Internet hat auch die Satellitennavigation Einzug in das Alltagsleben gefunden. Sie kann jedoch weit mehr, als genaue Positionen liefern. Schon bevor das amerikanische GPS im Jahr 1995 voll funktionstüchtig war, wurden die global und kontinuierlich verfügbaren Signale für geowissenschaftliche Anwendungen eingesetzt. Beispiele dafür sind das präzise Aufzeichnen der Bewegung der Kontinentalplatten mit einer Genauigkeit von einigen Millimetern pro Jahr, regionale und globale Atmosphärensondierung zur Verbesserung von Wetter- und Klimavorhersagen sowie die Fernerkundung von Wasser-, Eis- und Landoberflächen. Die Möglichkeiten von globalen Navigationssatellitensystemen (englisch Global Navigation Satellite Systems – GNSS) für die Erdbeobachtung und das Spektrum der Anwendungen vergrößern sich kontinuierlich. Diese Entwicklung wird vor allem durch den Übergang vom Einzelsystem GPS zum sogenannten Multi-GNSS stimuliert, welches das russische GLONASS, das chinesische BeiDou und das europäische Galileo mit einbezieht. Zusätzlich steigt die Anzahl von GNSS-Empfängern auf der Erdoberfläche und auf niedrigfliegenden Satelliten stetig an.

Exemplarisch werden im Folgenden GNSS-Anwendungen für die Erdbeobachtung vorgestellt, die am Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ entwickelt wurden und vor allem in Projekten zur Klimaforschung, zu Naturkatastrophen und zur Verbesserung von Wettervorhersagen zum Einsatz kommen.

Wasserdampfsondierung mit GNSS-Bodennetzen

Bodengestützte meteorologische Messungen mit GNSS-Verfahren basieren auf der Verfolgung der GNSS-Satelliten auf ihrem Weg von Horizont zu Horizont (Abb. 1). Am GFZ werden beispielsweise Daten von über 350 GNSS-Stationen in Deutschland ausgewertet. Daraus lässt sich der Wasserdampfgehalt in der Luftsäule über der Bodenstation (integrierter Wasserdampf, engl. IWV) ermitteln. Mittlerweile (seit 2006) sind die GNSS-Wasserdampfdaten fester Bestandteil der Datenbasis für die täglichen regionalen Wetter-

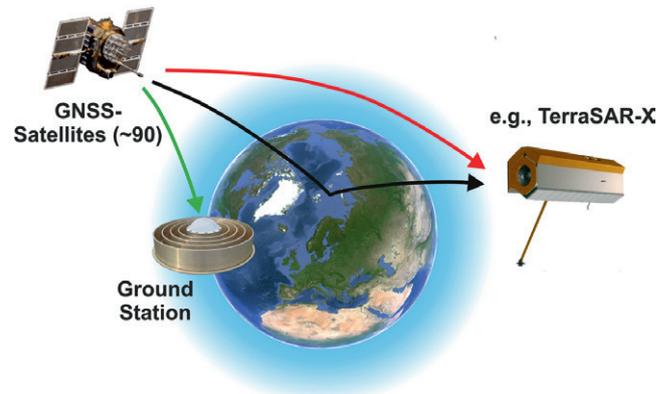


Abb. 1: Funktionsprinzip GNSS-basierter Methoden zur Fernerkundung der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Die Signale der momentan rund 90 aktiven GNSS-Satelliten werden beim Durchgang durch die Atmosphäre verändert: ihre Strahlen werden gekrümmt und die Wegstrecke dadurch verlängert. Wie groß die Veränderungen sind, hängt von Atmosphäreigenschaften ab, vor allem von Temperatur oder Wasserdampfgehalt. Genutzt werden GNSS-Messungen von Bodenstationen (grün) und Satelliten (z. B. TerraSAR-X, Radiookkultation, rot). Zusätzlich können von der Erdoberfläche reflektierte GNSS-Signale (schwarz) für die Fernerkundung eingesetzt werden.

Fig. 1: The principle of GNSS-based atmosphere and Earth surface remote sensing methods. The signals of the ~90 currently active GNSS satellites change as they pass through the atmosphere: they are bent, thus lengthening their path and travel time. The magnitude of these changes depends on atmospheric properties, mainly temperature or water vapor content. GNSS measurements are used by ground stations (green) and satellites (e.g. TerraSAR-X (until 2010), radio occultation; red). In addition, GNSS signals (black) reflected by water, ice and land surfaces can be used for remote sensing.

vorhersagen in Europa. Dazu werden die Daten des deutschen Stationsnetzes annähernd in Echtzeit verarbeitet und die Ergebnisse innerhalb von nur einer Stunde nach der Messung für die Wetterdienste bereitgestellt. Das Stationsnetz ist so dicht geknüpft, dass sich aus den Messdaten dreidimensionale Verteilungen des Wasserdampfs ableiten lassen (Abb. 2). Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas der Atmosphäre, rund zwei Drittel des natürlichen Treibhauseffekts werden durch ihn verursacht. Untersucht man seine langfristigen Änderungen, lassen sich Schlussfolgerungen im Hinblick auf mögliche Klimaänderungen ziehen (Abb. 3, Ning et al., 2016). Die relativ neuen GNSS-Verfahren sind dabei mittlerweile als eine der Standardmessmethoden anerkannt. Beispielsweise werden am GFZ die GNSS-Daten des GRUAN-Netzes (GCOS Reference Upper Air Network, www.gruan.org) der World Meteorological Organization (WMO) im Rahmen von GCOS (Global Climate Observing System) analysiert. GNSS-Empfänger sind dabei fester Bestandteil der Messausrüstung von gegenwärtig 24 global verteilten GRUAN-Observatorien. Auch für das Deutschlandnetz können Trends klimatologischer Parameter aus IWV-Zeitreihen abgeleitet werden (Alshawaf et al., 2017).

Links: Titelbild des Vorschlags für die neue Satellitenmission G-TERN zur GNSS-Reflektometrie und Atmosphärensondierung, der im Juni 2017 an die Europäische Weltraumbehörde ESA unter Leitung des GFZ im Rahmen des Earth-Explorer-9-Programms eingereicht wurde (Bild: M. Dziggel, GFZ)

Left: Title picture of the Earth Explorer 9 Proposal G-TERN for GNSS-Reflectometry and Atmosphere Sounding, which was submitted under lead of GFZ to the European Space Agency in June 2017



Kontakt: J. Wickert
(wickert@gfz-potsdam.de)

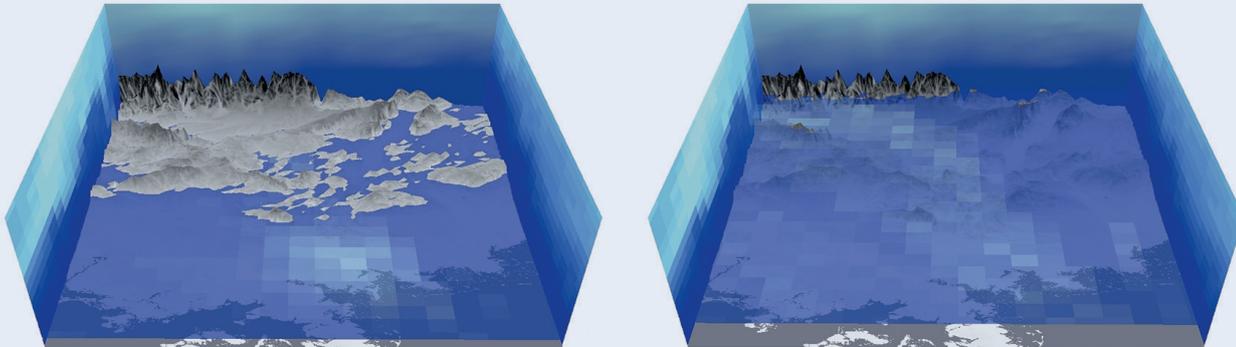


Abb. 2: Blick von Nord auf eine dreidimensionale Wasserdampfverteilung über Deutschland am 6. August 2007, die aus Messungen von rund 350 GPS-Bodenstationen mit tomographischen Verfahren abgeleitet wurde (hinten: Alpen; vorn: Ost- und Nordsee). Dargestellt sind zwei horizontale Schnitte durch die 3D-Verteilung, links in 300 und rechts in 1000 m Höhe. Die Verteilung wird auf einer räumlichen Gitterstruktur mit einer Auflösung von 35×35 km in der Horizontalen und rund 300 m in der Vertikalen erstellt. Die Farbtiefe ist proportional zum Wasserdampfgehalt, von Weiß (trocken) bis Dunkelblau (sehr feucht). Die linke und rechte Begrenzung der Abbildungen sind jeweils Vertikalschnitte durch die 3D-Rekonstruktion. Die zeitliche Veränderung dieser Verteilung ist mit Wetterphänomenen gekoppelt und kann zur Wettervorhersage genutzt werden (siehe Bender et al., 2011).

Fig. 2: Three-dimensional water vapor distribution over Germany on 6 August 2007 viewed from the north (background = Alps in Southern Germany, foreground = Baltic and Northern Sea). It was derived from measurements taken by approx. 350 GPS ground stations using tomographic methods. The images show two horizontal sections through the 3D distribution, on the left at an altitude of 300 m and on the right at 1000 m. The distribution is created on a spatial grid structure with a resolution of 35×35 km horizontally and approx. 300 m vertically. The color intensity is proportional to the vapor content, from white (dry) to dark blue (very moist). The left and right limits of the images are each vertical sections through the 3D reconstruction. The change of this distribution over time is coupled with weather phenomena and can be used for weather forecasting (see Bender et al., 2011).

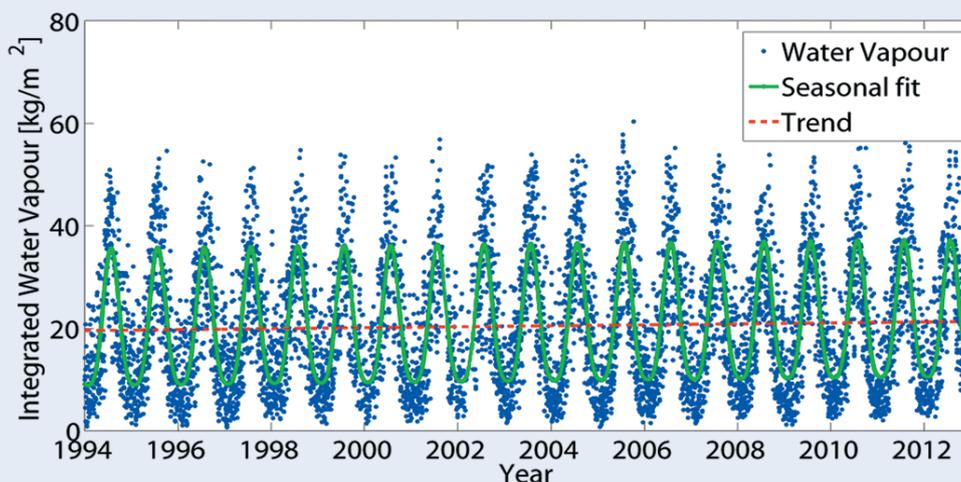


Abb. 3: IWV-Zeitreihe der GNSS-Station Greenbelt (USA). Ein Trend von $0,94$ mm/Jahr wurde ermittelt. Der zugehörige Datensatz umfasst rund 800 global verteilte Stationen mit einer Länge von 20 Jahren (Ning et al., 2016).

Fig. 3: IWV time series at the GNSS station Greenbelt (U.S.). A trend of 0.94 mm/year was derived, based on data of a set consisting of ~ 800 stations with a length of 20 years (Ning et al., 2016).

Über 100 Stationen liefern seit mehr als zehn Jahren Daten und können zur Untersuchung regionaler Unterschiede der abgeleiteten Trends und zur Verbesserung von Klimamodellen genutzt werden. In Mitteleuropa wird gegenwärtig im Mittel eine Zunahme des IWV von etwa 1 mm pro Dekade beobachtet.

Globale Atmosphärensondierung mit GNSS-Radiookkultation

Mit GNSS-Radiookkultationsmessungen (GNSS-RO) von Satelliten können globale Atmosphärenparameter erfasst werden. Dabei befinden sich spezielle GNSS-Empfänger auf Satelliten in erdnaheer Umlaufbahn (in rund 300 bis 1000 km Höhe, engl. Low Earth Orbit, LEO). Durch die bei LEO-Satelliten im Vergleich zu den höher fliegenden Navigationssatelliten deutlich kürzere Umlaufzeit (rund 1,5 h statt 12 h) kommt es beim Empfang der Signale zu zahlreichen Signalunterbrechungen bei den sogenannten Auf- und Untergängen der Navigationssatelliten (Okkultationen, lat. occultare: (etwas) bedecken). Während dieser etwa 1 bis 2 Minuten andauernden Perioden werden die GNSS-Signale mit hoher Frequenz (50 Hz) aufgezeichnet und wird die Brechung der Signalwege (siehe Abb. 1) bestimmt. Mathematische Verfahren erlauben daraus vertikale Profile atmosphärischer Parameter wie Luftdruck, Temperatur, Wasserdampf oder auch der Elektronendichte in größeren Höhen abzuleiten. Haupteigenschaften der Methode sind globale und kontinuierliche Verfügbarkeit, hohe vertikale Auflösung, Unabhängigkeit von Bewölkung und Kalibrationsfreiheit – Schlüsseigenschaften für Anwendungen in der Klimaforschung.

Der internationale Durchbruch der GNSS-RO für operationelle Anwendungen gelang mit dem GFZ-Satelliten CHAMP, der am 15. Juli 2000 gestartet wurde und bis zum Missionsende am 19. September 2010 hochgenaue Beobachtungsdaten lieferte. Die

Daten von CHAMP wurden nach langjährigen Vorstudien und damit verbundenen kritischen Qualitätsprüfungen erstmals 2006 operationell zur Verbesserung globaler Wettervorhersagen eingesetzt. Der nahezu dekadische GNSS-RO-Langzeitdatensatz ist nach wie vor einzigartig und bildet weltweit die Basis vielfältiger Untersuchungen zu klimatologischen Veränderungen der Erdatmosphäre (Wickert et al., 2012). Das GFZ ist gegenwärtig neben GRACE und in Zukunft GRACE-FO auch für die GNSS-RO an Bord der deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X verantwortlich.

Gegenwärtig werden die GNSS-RO-Ionosphärenparameter zur Untersuchung ionosphärischer Störungen eingesetzt (Arras und Wickert, 2017), die auch zur Untersuchung des Weltraumwetters genutzt werden können (Abb. 4).

Vermessung von Meeres- und Eisoberflächen mit GNSS-Reflektometrie

GNSS-Signale werden von Wasser- und Eisoberflächen reflektiert. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um die Höhe der reflektierenden Oberfläche mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich zu vermessen, im Fokus stehen dabei topografische Anomalien der Ozeanoberfläche. Die Anomalien entstehen entlang der Ozeanströmungen und der damit verbundenen Variabilität von Temperatur und Salzgehalt. Sofern keine weiteren Phänomene auftreten (z. B. ein Tsunami), haben diese Anomalien eine Amplitude von weniger als 2 m. Am GFZ werden altimetrische GNSS-Reflektometriemessungen im Küstenbereich, von Flugplattformen und von Satelliten aus durchgeführt. Als Beispiel zeigt Abb. 5 Reflexionsereignisse über dem Mittelmeer, die während der GEOHALO-Mission (6. bis 12. Juni 2012) mit dem deutschen Forschungsflugzeug HALO aufgezeichnet wurden. Während der Messung wandert der Reflexionspunkt auf der Wasseroberfläche, womit große

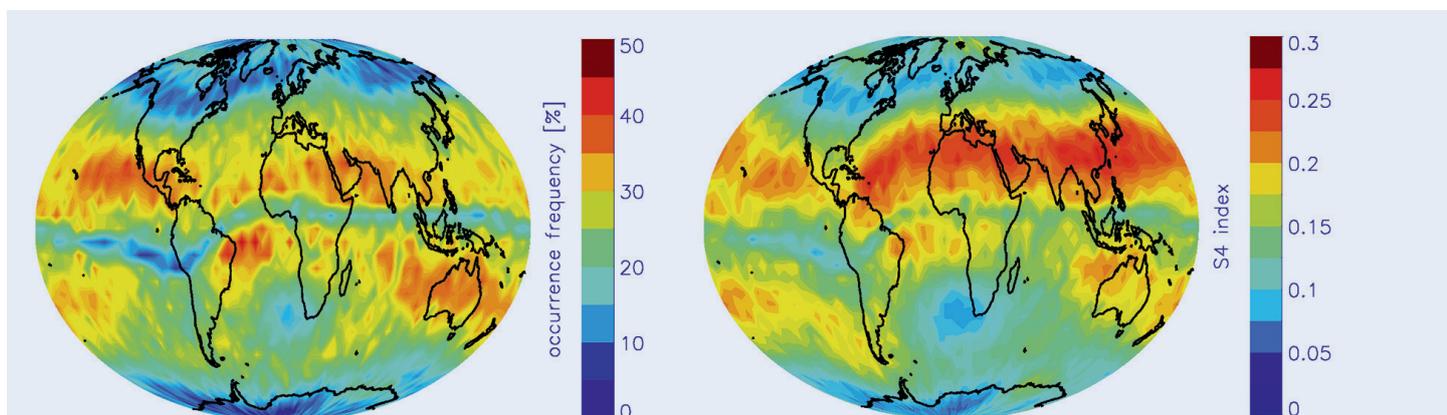


Abb. 4: Globale Auftretenshäufigkeit ionosphärischer Störungen (links) und deren Amplitude (rechts). Beide Abbildungen basieren auf GNSS-RO-Daten der FORMOSAT-3/COSMIC-Satelliten in 2014 und 2015.

Fig. 4: Global occurrence distribution of ionospheric irregularities (left) and intensity (right). Both figures include GNSS RO data provided by the FORMOSAT-3/COSMIC satellite mission during 2014-2015.

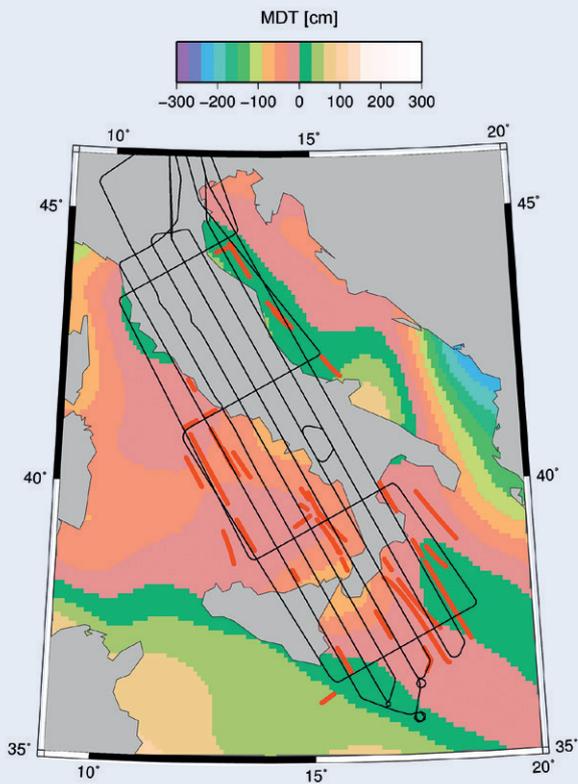


Abb. 5: Karte der mittleren dynamischen Meerestopographie (MDT) für das Mittelmeer nahe der Apenninhalbinsel nach dem globalen DTU-2010-Modell. Die MDT ist auf das EGM-2008-Geoid bezogen. Die HALO-Flugtrajektorien sind als schwarze Linien dargestellt. Die roten Linien zeigen die Spuren der Reflexionsereignisse über dem Mittelmeer.

Fig. 5: Map of the Mean Dynamic ocean Topography (MDT) for the Mediterranean Sea near Apennine peninsula according to the global DTU-2010 model. The MDT refers to the EGM-2008 geoid. The HALO flight trajectory is indicated as black line. The red lines show the tracks of the reflection events over the Mediterranean Sea.

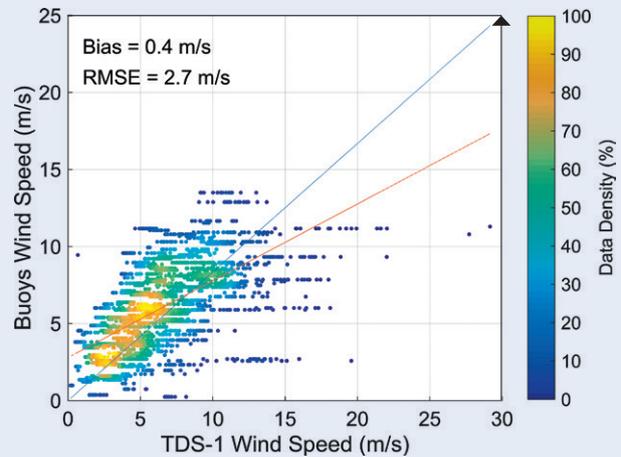


Abb. 6: Vergleich von TDS-1 (GNSS-R) mit bojenbasierten Windgeschwindigkeiten der TAO-, PIRATA- und RAMA-Netzwerke im Zeitraum November 2014 bis März 2016. Abkürzungen siehe engl. Bildunterschrift

Fig. 6: Comparison of TDS-1 (GNSS-R) and buoys wind speeds by Tropical Atmosphere Ocean (TAO) in the Pacific, moored array in the Tropical Atlantic (PIRATA) and the moored array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction (RAMA) for the period November 2014 to March 2016



Abb. 7: Im Vordergrund: Geodätische GNSS-Bodenstation in Sutherland, Südafrika. Im Hintergrund links: klassische Bodenfeuchtesensoren (Foto: M. Ramatschi, GFZ)

Fig. 7: Foreground: Geodetic GNSS ground station in Sutherland, South Africa. Background left: traditional soil moisture sensors.

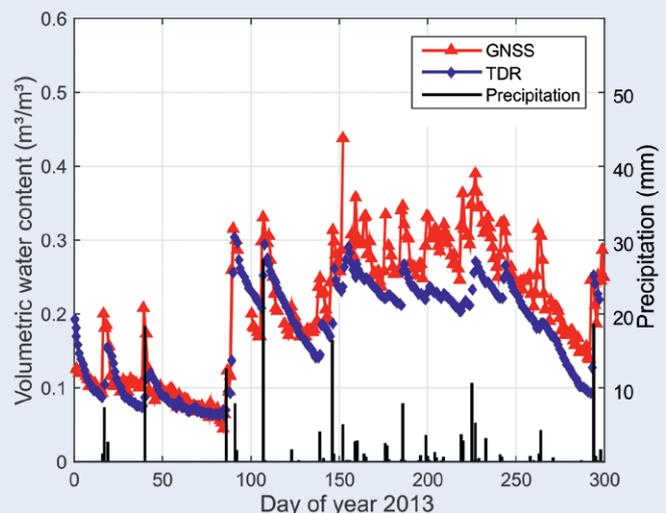


Abb. 8: Variation der Bodenfeuchte in Sutherland, Südafrika, abgeleitet aus GNSS-Daten (rot) und TDR-Sensoren (blau). Schwarze Linien markieren Niederschlagsereignisse.

Fig. 8: Soil moisture variation in Sutherland, South Africa, derived from GNSS data (red) and TDR sensors (blue). Black bars indicate precipitation events.

Flächen mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich vermessen werden können. Ungünstige Beobachtungsgeometrien und atmosphärische Ausbreitungsfehler begrenzen die Genauigkeit der Methode (Semmling *et al.*, 2014).

Weiterhin ist das GFZ an der Entwicklung von weltraumgestützten GNSS-Reflektometrieexperimenten (GNSS-R) zur globalen Vermessung von Meeres- und Eisoberflächen in führender Position beteiligt (GEROS-ISS, G-TERN; Wickert *et al.*, 2016, 2017). Eine mögliche Anwendung ist der Einsatz als Bestandteil zukünftiger satellitengestützter Tsunami-Frühwarnsysteme (Stosius *et al.*, 2010).

Neben der Höhe der Meeresoberfläche können aus den reflektierten Signalen auch Informationen über deren Rauigkeit abgeleitet werden. Diese ist wiederum mit Eigenschaften wie der Wellenhöhe verbunden, die von der Windgeschwindigkeit abhängt. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich von Windgeschwindigkeiten, abgeleitet aus GNSS-Reflektometriemessungen des experimentellen englischen Satelliten TDS-1 (TechDemoSat-1) mit Vorortmessungen von Bojen. Obwohl die Daten von TDS-1 mit einfacher GNSS-Ausrüstung aufgezeichnet wurden, stimmen sie gut mit den Bojendaten überein. Von zukünftigen Satellitenmissionen wird eine bessere Datenqualität erwartet. Der große Vorteil der GNSS-Messungen im L-Band im Vergleich zu etablierten Windmessungen mit Satelliten (Scatterometer im C- und Ku-Band) ist die Möglichkeit der Beobachtung auch bei Bewölkung und starkem Regen, womit z. B. auch Messdaten im Inneren von Wirbelstürmen oder während anderer Extremwetterereignisse gewonnen werden können.

Landoberflächenmonitoring mit GNSS-Bodenstationen

Eine wichtige neuartige GNSS-Erdbbeobachtungsanwendung mit bereits bestehenden Infrastrukturen ist die Ableitung von Landoberflächenparametern in der Nähe von GNSS-Bodenstationen (Abb. 7). Abbildung 8 zeigt dafür als Beispiel den zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchte in der Nähe der vom GFZ betriebenen Station Sutherland, Südafrika, im Jahr 2014. Die Analyse basiert auf der Auswertung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) der GNSS-Signale, aus der deren Eindringtiefe in den Erdboden abgeleitet werden kann. Diese hängt wiederum von der Bodenfeuchte ab und kann somit gemessen werden. Die GNSS-basierten Bodenfeuchtemessungen geben sehr gut die Niederschlagsereignisse und die nachfolgende Verdunstung wieder und stimmen mit den Messungen der unabhängigen In-situ-TDR-Sensoren (Time Domain Reflectometry) im Bereich von 6 Vol. % überein (Vey *et al.*, 2016a). GNSS-Beobachtungen haben damit das Potenzial, an zahlreichen der weltweit verteilten Stationen das globale Beobachtungsnetz für Bodenfeuchte zu verdichten. Mit der gleichen Auswertemethode können auch Schneehöhen im Umfeld der Station auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden (Vey *et al.*, 2016b).

Messung der Deformation der Erdoberfläche in Echtzeit

Bodengestützte GNSS-Beobachtungen in Echtzeit bilden das Rückgrat von komplexen technischen Systemen zur Aufzeichnung von seismischen Deformationen der Erdoberfläche als Bestandteil von Frühwarnsystemen (Babeyko *et al.*, 2013). Die GNSS-Komponenten für solche Systeme (Ge *et al.*, 2012) werden kontinuierlich weiterentwickelt und erfahren durch den gegenwärtigen Übergang vom Einzelsystem GPS zu Multi-GNSS mit allen derzeit verfügbaren Navigationssatelliten einen Aufschwung, der mit einer Erhöhung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit verbunden ist (Li *et al.*, 2015). Am GFZ wurde ein sogenanntes RTPP-System (Echtzeit-Positionierungssystem) entwickelt, das als Basis für Positionierungs-, aber auch geowissenschaftliche Echtzeitanwendungen dient (Abb. 9). Hauptziel des RTPP ist die Bereitstellung von spezifischen Korrekturinformationen, um die Genauigkeit und schnelle Verfügbarkeit der Positionierungslösungen deutlich zu verbessern. Abbildung 10 zeigt als Beispiel eine Anwendung mit simulierten GNSS-Echtzeitdaten für die Ableitung der Magnitude und der maximalen Plattenverschiebung des Illapel-Erdbebens vom September 2015 in Chile mit mathematischen Inversionsmodellen (Chen *et al.*, 2016). Für das verwendete Verfahren ergeben sich leicht unterschiedliche Werte für die Nutzung von nur GPS-Daten (Magnitude 8,22; maximale und mittlere Verschiebung 3,91 m und 0,45 m) im Vergleich zur kombinierten Nutzung von GPS und GLONASS (Magnitude 8,25; maximale und mittlere Verschiebung 4,50 m und 0,57 m). Eine der möglichen Ursachen für diesen Unterschied ist eine Verbesserung der Analysen durch Hinzunahme der GLONASS-Daten.

Ausblick

GNSS-Anwendungen haben sich in den vergangenen Jahren auch dank intensiver Forschungsarbeiten am GFZ zu einer vielseitigen Ergänzung der bestehenden Erdbbeobachtungsverfahren entwickelt. In diesem Beitrag wurden Anwendungen vorgestellt, die am GFZ entwickelt und zum Teil auch operationell eingesetzt werden. Dazu gehören boden- und satellitengestützte Verfahren zur Atmosphärensondierung, die bereits einen ausgereiften Entwicklungsgrad haben und weltweit anerkannt sind. Hauptanwendungen sind hierbei Wettervorhersage, Klimaforschung und Weltraumwetter. Operationelle Systeme zur Echtzeitdeformationsanalyse sind ebenso etabliert und bereits Bestandteil von Frühwarnsystemen. Die GNSS-Reflektometrie besitzt ein hohes Potenzial für Wettervorhersage, Frühwarnsysteme und Klimaforschung. Sie ist derzeit noch in der Entwicklungsphase. Der Übergang vom Einzelnavigationssystem GPS zum Multi-GNSS erweitert mit GLONASS, Galileo und BeiDou erhöht Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der GNSS-Anwendungen zur Erdbbeobachtung und verbessert zusätzlich die räumliche und zeitliche Auflösung der Messungen. Die Weiterentwicklung der vielfältigen geophysikalischen Multi-GNSS-Anwendungen mit Echtzeitfähigkeit wird deswegen zusammen mit dem Einsatz der GNSS-Reflektometrie für die Fernerkundung von Wasser-, Eis-, und Landoberflächen von Satelliten aus in den kommenden Jahren im Mittelpunkt der GFZ-Forschungsarbeiten stehen.

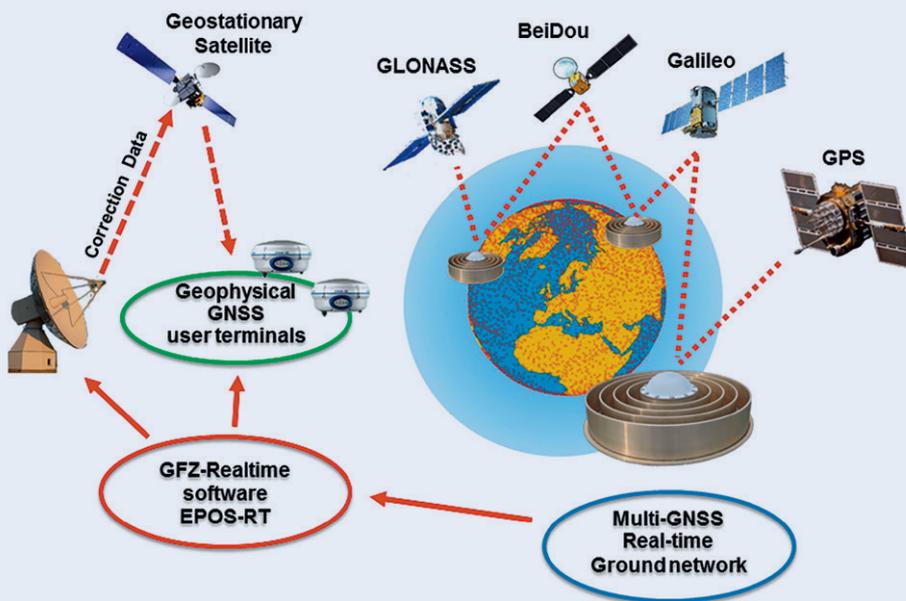


Abb. 9: Übersicht des GNSS-Echtzeit-prozessierungssystems, das am GFZ entwickelt wurde. Daten eines globalen Multi-GNSS-Bodennetzes werden mit der EPOS-RT-Software analysiert. Die resultierenden Korrekturdaten werden entweder direkt über das Internet oder über geostationäre Satelliten an die Nutzerterminals im Feld übertragen.

Fig. 9: Overview on the GNSS RealTime Precise Positioning (RTPP) system developed by GFZ. Data from a global Multi-GNSS ground network are analysed using the EPOS-RT software. Resulting correction data are transmitted either directly or via geostationary satellite to the user terminal in the field.

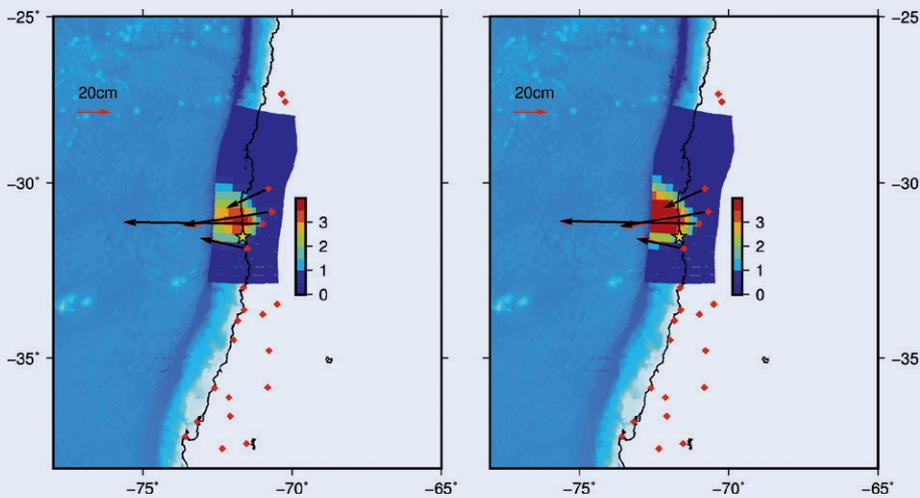


Abb. 10: Illapel-Erdbeben (Chile, 2015). Ergebnis von Slip-Inversionsrechnungen aus GPS-Daten (links) und GPS/GLONASS-Daten (rechts). Die roten Vektoren kennzeichnen die beobachteten ko-seismischen statischen Offsets und die schwarzen repräsentieren die synthetischen Werte (aus Chen et al., 2016, Abb. 13, Geophysical Journal International, published by Oxford University Press on behalf of The Royal Astronomical Society)

Fig. 10: Slip inversions based on co-seismic displacements from GPS (left) and GPS/GLONASS (right). The red vectors denote observed co-seismic static offsets, and the black ones represent synthetic values (from Chen et al., 2016, Fig. 13, Geophysical Journal International, published by Oxford University Press on behalf of The Royal Astronomical Society)

Literatur

- Alshawaf, F., Balidakis, K., Dick, G., Heise, S., Wickert, J. (2017): Estimating trends in atmospheric water vapor and temperature time series over Germany. - *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, pp. 3117–3132. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-10-3117-2017>
- Arras, C., Wickert, J. (2017 online): Estimation of ionospheric sporadic E intensities from GPS radio occultation measurements. - *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.006>
- Babeyko, A. Y., Hoehner, A., Ge, M., Wang, R., Sobolev, S. V. (2013): Schnelle und zuverlässige Tsunami-Frühwarnung mit hochpräziser Echtzeit-GNSS-Prozessierung und gleichzeitiger Simulation. - *System Erde*, 3, 1, pp. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.03.01.6>
- Bender, M., Stosius, R., Zus, F., Dick, G., Wickert, J., Raabe, A. (2011): GNSS water vapour tomography – Expected improvements by combining GPS, GLONASS and Galileo observations. - *Advances in Space Research*, 47, 5, pp. 886–897. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.09.011>
- Chen, K., Ge, M., Babeyko, A. Y., Li, X., Diao, F., Tu, R. (2016): Retrieving real-time co-seismic displacements using GPS/GLONASS: a preliminary report from the September 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake in Chile. - *Geophysical Journal International*, 206, 2, pp. 941–953. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw190>
- Ge, M., Chen, J., Dousa, J., Gendt, G., Wickert, J. (2012): A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime. - *GPS Solutions*, 16, 1, pp. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0206-z>
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., Schuh, H. (2015): Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. - *Journal of Geodesy*, 89, 6, pp. 607–635. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0802-8>
- Ning, T., Wickert, J., Deng, Z., Heise, S., Dick, G., Vey, S., Schöne, T. (2016): Homogenized time series of the atmospheric water vapor content obtained from the GNSS reprocessed data. - *Journal of Climate*, 29, 7, pp. 2443–2456. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0158.1>
- Saynisch, J., Semmling, M., Wickert, J., Thomas, M. (2015): Potential of space-borne GNSS reflectometry to constrain simulations of the ocean circulation. - *Ocean Dynamics*, 65, 11, pp. 1441–1460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0886-y>
- Semmling, M., Beckheinrich, J., Wickert, J., Beyerle, G., Schön, S., Fabra, F., Pflug, H., He, K., Schwabe, J., Scheinert, M. (2014): Sea surface topography retrieved from GNSS reflectometry phase data of the GEOHALO flight mission. - *Geophysical Research Letters*, 41, 3, pp. 954–960. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013GL058725>
- Stosius, R., Beyerle, G., Hoehner, A., Wickert, J., Lauterjung, J. (2011): The impact on tsunami detection from space using GNSS-reflectometry when combining GPS with GLONASS and Galileo on GNSS-Reflectometry tsunami detection from space. - *Advances in Space Research*, 47, 5, pp. 843–853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.09.022>
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T., Thoss, H., Ramatschi, M. (2016a): Monitoring Snow Depth by GNSS Reflectometry in Built-up Areas: A Case Study for Wettzell, Germany. - *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9, 10, pp. 4809–4816. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2516041>
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T., Ramatschi, M. (2016b): Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. - *GPS Solutions*, 20, 4, pp. 641–654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0474-0>
- Wickert, J., Gendt, G. (2006): Fernerkundung der Erdatmosphäre mit GPS. - *Promet: meteorologische Fortbildung*, 32, 3/4, pp. 176–184.
- Wickert, J., Schmidt, T., Heise, S., Arras, C., Beyerle, G., Zus, F. (2012): GNSS-Radiookkultation: globale atmosphärische Klimauntersuchungen mit Signalen von Navigationssatelliten. - *System Erde*, 2, 1, pp. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.02.01.6>
- Wickert, J., Cardellach, E., Martín-Neira, M., Bandeiras, J., Bertino, L., Andersen, O. B., Camps, A., Catarino, N., Chapron, B., Fabra, F., Floury, N., Foti, G., Gommenginger, C., Hatton, J., Høeg, P., Jäggi, A., Kern, M., Lee, T., Li, Z., Park, H., Pierdicca, N., Ressler, G., Rius, A., Roselló, J., Saynisch, J., Soulat, F., Shum, C. K., Semmling, M., Sousa, A., Xi, J., Zufada, C. (2016): GEROS-ISS: GNSS Reflectometry, Radio Occultation, and Scatterometry Onboard the International Space Station. - *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9, 10, pp. 4552–4581. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2614428>
- Wickert, J., Cardellach, E., Baggen, R., Benito, J., Camps, A., Catarinho, N., Chapron, B., Flato, G., Fragner, H., Gabarró, C., Gommenginger, C., Haas, C., Healy, S., Hernandez-Pajares, M., Høeg, P., Jäggi, A., Kainulainen, J., Abbas Khan, S., Lemke, N., Nghiem, S.V., Pierdicca, N., Portabella, M., Rautiainen, K., Rius, A., Sasgen, I., Semmling, M., Shum, C.K., Soulat, F., Steiner, A.K., Tailhades, S., Thomas, M., Vilaseca, R., Zufada, C. (2017): G-TERN: GNSS Transpolar Earth Reflectometry monitoring system, Proposal for an Earth Explorer 9 Mission, European Space Agency.

Geomagnetismus und Partikelstrahlung im Weltraum

Claudia Stolle, Yuri Shprits, Jan Saynisch, Foteini Vervelidou, Jürgen Matzka
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The geomagnetic field originates in the Earth's outer core and reaches into space for several Earth radii. It thereby tells us about variations in the deep Earth, controls the shape and strength of electric currents and particle drift in the ionosphere and magnetosphere, and protects Earth's life from solar and cosmic radiation. It is therefore important to understand the geophysical processes that lead to geomagnetic variations, and how the solar-terrestrial system is affected by space weather events. Research on geomagnetism, upper atmosphere research and magnetospheric as well as radiation belt physics profit enormously from dedicated satellite missions in low Earth orbit. GFZ's scientific achievements in these research areas significantly benefit from ESA's Swarm constellation mission, launched in 2013. GFZ contributed largely to its design and product definition by leveraging experiences from the successful CHAMP mission operated by GFZ during the last decade. Parameters including the geomagnetic and electric field, air density and wind, electron content and temperature are measured with high precision and global coverage. Also, particle flux measurements on the Lomonosov satellite will help us better understand the loss of particles from the Van Allen radiation belts into the atmosphere. The data from these missions are currently also utilized within the GFZ-coordinated Priority Programme 1788 "Dynamic Earth" funded by the German Research Foundation.



Tief im Innern unseres Planeten, im äußeren Erdkern, bewegt sich flüssiges Eisen und erzeugt ein Magnetfeld, das so stark ist, dass es zigtausende Kilometer in den Weltraum reicht (Abb. 1). Das Erdmagnetfeld lenkt solare und kosmische Strahlung von der Erde ab und wird damit zum Schutzschild, ohne das ein Leben, wie wir es kennen, kaum möglich wäre. Für den Menschen ist das Magnetfeld nicht unmittelbar wahrnehmbar, aber schon eine einfache Kompassnadel zeigt deutlich seine Kraftwirkung. Mit hochempfindlichen, wissenschaftlichen Magnetometern wird nachgewiesen, dass das Erdmagnetfeld in ständiger Veränderung ist und dies auf allen Zeitskalen, von Sekunden bis Jahrtausenden. Die Erforschung der unterschiedlichen Quellen des Erdmagnetfelds durch Beobachtungen, Analysen und Modellierung liefert wichtige Erkenntnisse zum langfristigen globalen Wandel in der Atmosphäre, den Ozeanen und im Erdinnern (z. B. Stolle *et al.*, 2017).

Durch die zunehmende Nutzung neuer Technologien, wie kabellose Datenübertragung, autonome Fahrzeuge oder Satellitennavigation, ist unsere Gesellschaft aber auch verwundbar gegenüber elektromagnetischen Störungsereignissen, die in der Sonnenaktivität ihren Ursprung haben und durch den Sonnenwind sowie das Erdmagnetfeld in die technischen Systeme übertragen werden. Für das sogenannte Weltraumwetter ist das Erdmagnetfeld deshalb ein wichtiger Faktor.

Neben dem äußeren Erdkern gibt es weitere Quellen des Erdmagnetfelds, wie etwa die Gesteinsmagnetisierung der Erdkruste und elektrische Ströme im Weltraum, in der Atmosphäre, in den Ozeanen und im Erdmantel. Die Geometrie des Erdmagnetfelds bestimmt dabei die Lage der Polarlichter in der Ionosphäre und die Lage der Strahlungsgürtel in der Magnetosphäre. Gleichzeitig erzeugen die elektrischen Ströme, die z. B. bei der Entstehung der Polarlichter fließen, wiederum Magnetfelder, die dann ein Teil des Erdmagnetfelds sind. Eine umfassende Beschreibung dieser Ereignisse ist Teil des Forschungsgebiets Geomagnetismus.



Abb. 1: Künstlerische Darstellung des Erdmagnetfelds, das tief im Erdinnern entsteht und sich weit in den Weltraum ausdehnt. Es lenkt von der Sonne (oben rechts) stammende Partikelstrahlung von der Erde (Mitte unten) ab. (Illustration: M. Rother, GFZ)

Fig. 1: Artistic representation of the geomagnetic field. The field originates in deep Earth and spreads wide into space. It redirects solar (upper right part in panel) wind particles away from Earth (mid lower part in panel).

Links: Satelliten-Trio auf Forschungsreise durch das Magnetfeld der Erde. Swarm ist eine Satellitenmission im Earth Observation Opportunity Programme der ESA. Die Mission besteht aus drei baugleichen Satelliten (A, B und C), die die Erde als Konstellation auf polaren Bahnen umkreisen. (Grafik: ESA/AOES Medialab)

Left: Satellite trio on a research expedition through the magnetic field of the Earth. Swarm is a satellite mission within ESA's Earth Observation Opportunity Program. The mission consists of three identical satellites (A, B and C), which cruise the Earth as a constellation on polar orbits.

LEO-Satelliten auf besonderer Mission

Moderne, auf die Vermessung des Erdmagnetfelds zugeschnittene Satellitenmissionen haben seit der Jahrtausendwende die geomagnetische Forschung revolutioniert. Sie ermöglichen hochpräzise, weltumspannende Messungen des Erdmagnetfelds, da sie in niedrigen Orbits fliegen. Mit diesen sogenannten LEO-Satelliten (Englisch: Low Earth Orbiting satellites) können im Besonderen die Quellen der Ionosphäre quantifiziert werden, wenn sie gleichzeitig weitere Eigenschaften der Hochatmosphäre erfassen. Die erste Satellitenmission dieser Art war CHAMP (CHallenging Mini Satellite Payload), welche unter Leitung des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ im Jahr 2000 erfolgreich ins All startete.



Kontakt: C. Stolle
(claudia.stolle@gfz-potsdam.de)

Um Störungen der Magnetfeldmessungen durch den Satelliten selbst zu verhindern, wird beim Zusammenbau des Satelliten auf magnetische Reinheit geachtet und das Magnetometer wird an einem Ausleger, also mit einem gewissen Abstand zum Satelliten selbst, angebracht. Sternenkameras sorgen dafür, dass die Magnetfeldvektordaten immer in einem absoluten Referenzkoordinatensystem angegeben werden können.

Nachdem CHAMP im Jahr 2010 in der Atmosphäre verglühte, startete am 22. November 2013 unter der Leitung der Europäischen Weltraumbehörde ESA die Konstellationsmission Swarm. Diese besteht aus drei baugleichen polar umlaufenden Satelliten, wovon zwei Satelliten im Duett in 450 km und der dritte Satellit in 510 km Höhe fliegen (siehe Abb. Seite 32). Diese Konstellation ist für ein breites Spektrum an wissenschaftlichen Fragestellungen konzipiert, das sich von der Erforschung des Erdkerns über den Erdmantel und die Erdkruste bis zur Hochatmosphäre und den erdnahen Weltraum erstreckt. Die Swarm-Mission liefert neben Messungen des Erdmagnetfelds auch Beobachtungen der Elektronendichte in der Ionosphäre, der Elektronen- und Ionentemperatur, des elektrischen Felds und der Atmosphärendichte. Dazu werden auf jedem Satelliten ein Fluxgate-Vektormagnetometer mit drei Sternenkameras, ein optisch gepumptes Absolutmagnetometer, ein Ionendriftmessgerät, eine Langmuir-Sonde, ein Akzelerometer, ein GPS-Empfänger und ein Laserreflektor geflogen.

In die Konzeption der Swarm-Mission sind wertvolle Erfahrungen aus der CHAMP-Mission eingeflossen. Das GFZ stellte einen der drei wissenschaftlichen Projektleiter von Swarm und beteiligt sich, neben der wissenschaftlichen Auswertung, maßgeblich an der Definition, Kalibrierung und Validierung der Swarm-Datenprodukte. Im Besonderen trägt das GFZ mit einem Magnetfeldmodell des Erdkerns und Weltraumwetterprodukten bei. Zu diesen gehören die Quantifizierung von Strömen zwischen der Hochatmosphäre und erdnahem Weltraum, die Bestimmung des

Elektronengehalts der Ionosphäre und Plasmasphäre sowie die Erkennung ionosphärischer Störungen, die auch den Empfang der GPS-Signale stören können.

Eine besondere Möglichkeit, die Swarm-Daten national wissenschaftlich zu nutzen, ergibt sich aus dem vom GFZ koordinierten Schwerpunktprogramm 1788 „DynamicEarth“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (<http://www.spp-dynamicearth.de/de/spp1788-dynamicearth>).

Verborgenes: Das Erdinnere

Rund 90 % des Erdmagnetfelds stammen von der am tiefsten gelegenen Quelle, dem äußeren Erdkern, und zeigen ausgeprägte Anomalien. Diese sind nicht nur für die geophysikalische Forschung, sondern auch für die Navigation von Interesse. Das neue, auf Daten der Swarm-Satelliten beruhende Kernfeldmodell „Mag.num“ des GFZ zeigt globale Asymmetrien, wie etwa drei Bereiche mit hoher Magnetfeldstärke (in Kanada, Sibirien sowie dem Gebiet zwischen Antarktis und Australien) und ein Gebiet geringer Feldstärke von Südamerika bis Südafrika – die Südatlantische Anomalie (SAA, Abb. 2). Die zeitliche Änderung der Fließbewegung im äußeren Erdkern, also tief im Erdinnern, verändert das Erdmagnetfeld mit der Zeit und kann über die Magnetfeldbeobachtungen und die Modellierung detektiert werden. Abbildung 2 zeigt auch strahlungsbedingte technische Störungen an den Swarm-Satelliten (Single Event Upset). Deutlich erkennbar ist der Zusammenhang mit dem Erdmagnetfeld: Das schwache Magnetfeld im Südatlantik kann die Satelliten nicht komplett vor magnetosphärischer, aus dem Strahlungsgürtel stammender Strahlung schützen. Durch die Magnetfeldänderungen werden sich auch die Lokationen von durch die Strahlung verursachten Satellitenstörungen in Zukunft verschieben.

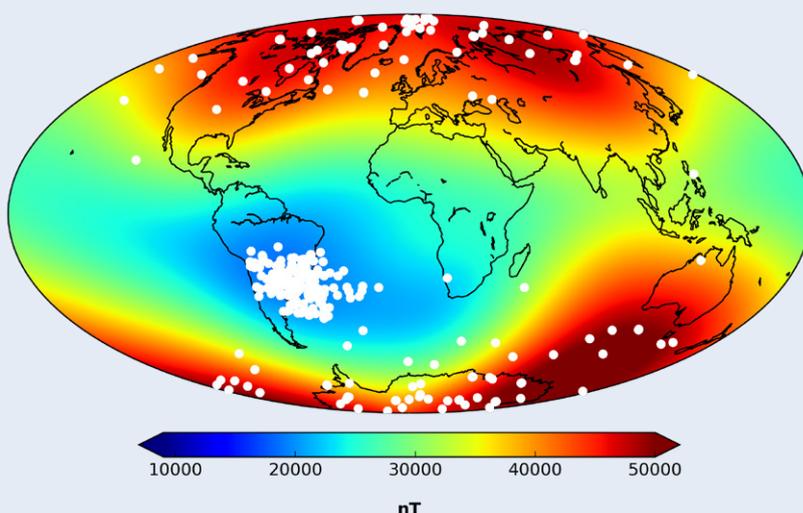


Abb. 2: Die Stärke des Kernfelds in einer Höhe von 471 km berechnet aus dem Mag.num-Modell des GFZ. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen schwachem Magnetfeld (blau) und strahlungsbedingten technischen Störungen der Swarm-Satelliten in dieser Höhe (weiße Punkte) ist zu erkennen. (Grafik: I. Michaelis, GFZ)

Fig. 2: Strength of the core field in an altitude of 471 km calculated from GFZ's Mag.num model. A distinct connection between low magnetic field values (blue) and radiation-induced technical failures of the Swarm satellites at this height (white dots) can be seen.

Magnetisierte Gesteine in der Lithosphäre tragen ebenfalls zum Erdmagnetfeld bei. Es ist möglich, ihr magnetisches Signal durch Datenprozessierung von dem des Erdkerns und dem Signal der Ionosphäre sowie Magnetosphäre zu trennen. Damit können Parameter der magnetisierten Gesteinsschicht der Lithosphäre, wie Mächtigkeit und Magnetisierung, bestimmt werden (Vervelidou und Thébaud, 2015). Diese Parameter sind wiederum von Eigenschaften wie dem Druck oder der Temperatur in der Lithosphäre abhängig. Abbildung 3 zeigt die radiale Komponente der Magnetisierung, abgeleitet aus Swarm-Daten. Die Swarm-Mission mit ihrem Konstellationsaspekt, insbesondere durch die zwei parallel fliegenden unteren Satelliten, ermöglicht durch die Messung des Ost-West-Gradienten des Magnetfelds eine verbesserte Abtrennung der nicht lithosphärischen Signale sowie eine höhere räumliche Auflösung der lithosphärischen Signale. Die räumliche Auflösung wird sich im Lauf der Satellitenmission weiter verbessern, da die Satelliten nach und nach absinken, d. h. niedrigere Orbits einnehmen und somit näher an die Lithosphäre herankommen.

Signale aus dem Ozean

Bereits 1832 spekulierte Michael Faraday über die elektromagnetische Induktion im Ozean. Elektromagnetische Messungen am Ozeanboden sind bis heute ein wichtiges Instrument der Ozeanographie, um vertikale Geschwindigkeitsprofile, ozeanische Massentransporte und sogar Tsunami detektieren zu können. Seit der CHAMP-Mission ermöglichen nun auch Satelliten-Magnetometer eine globale Messung dieser Eigenschaften.

Aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit und seiner Strömungsbewegung durch das Erdmagnetfeld induziert das Meerwasser elektromagnetische Signale, die unter anderem auch von der Temperatur und dem Salzgehalt des Meerwassers selbst abhängen. Diese Signale sind zwar am Ort der Satelliten extrem schwach, eine satellitengestützte Beobachtung ist aber dennoch möglich. Insbesondere gezeiteninduzierte Magnetfelder sind aufgrund ihrer strikten Periodizität relativ einfach zu detektieren. Wissen-

schaftlerinnen und Wissenschaftler am GFZ haben Methoden entwickelt und getestet, um mit Hilfe der Swarm-Satelliten diese Signale und ihre Abhängigkeit vom Salzgehalt und der Ozean-temperatur zur Überwachung der globalen Erwärmung der Ozeane zu nutzen (Saynisch et al., 2016; Saynisch et al., 2017; Abb. 4).

Wetter zwischen Atmosphäre und Weltraum

Entsprechend dem Wetter in der uns umgebenden Troposphäre gibt es natürliche Schwankungen in der Hochatmosphäre (zwischen etwa 80 bis 800 km). Wind, Dichte, Elektronengehalt und die ionosphärischen/magnetosphärischen elektrischen Ströme unterliegen typischen jahreszeitlichen Schwankungen und zeigen einen direkten Bezug zum solaren Zyklus, der im Schnitt elf Jahre dauert. Aber auch tägliche Schwankungen in der Dissipation von solarer Energie in Richtung Erde führen zu einem täglichen Wetter im erdnahen Weltraum, dem „Weltraumwetter“. Hier sind die Beobachtungen von LEO-Satelliten besonders relevant, da sie direkte Messungen mit globaler Abdeckung ermöglichen. Die Relevanz der Hochatmosphäre z. B. für die Lebensdauer von LEO-Missionen lässt sich direkt an der erwarteten Lebensdauer der Swarm-Mission selbst erkennen. Fällt das nächste solare Maximum, das im Moment für die Jahre 2022 bis 2024 erwartet wird, besonders hoch aus, so werden ohne eine künstliche Anhebung der Satellitenorbits die beiden unteren Satelliten im Jahr 2022 in die Atmosphäre eintreten und verglühen. Fällt der kommende Sonnenzyklus schwach aus, so fliegen diese Satelliten noch bis zum Jahr 2030 in über 350 km Höhe. Grund für diese Variabilität ist der Luftwiderstand, den die Satelliten erfahren und der sie mehr oder weniger stark abbremst. Die selben Bedingungen gelten für alle im erdnahen Weltraum befindlichen Objekte und sind grundlegend wichtige Parameter für die Bahnbestimmungen, sei es zur Vorhersage von Satellitenkollisionen, der Wiedereintritt von Weltraumschrott, oder für die Planung der kurz- und langfristigen Ausrichtung der Weltrauminfrastruktur. Die Verwendung der Swarm- und CHAMP-Daten für ein verbessertes Modell der Thermosphäre werden in einem aktuellen Projekt innerhalb des Schwerpunktprogramms „DynamicEarth“ entwickelt.

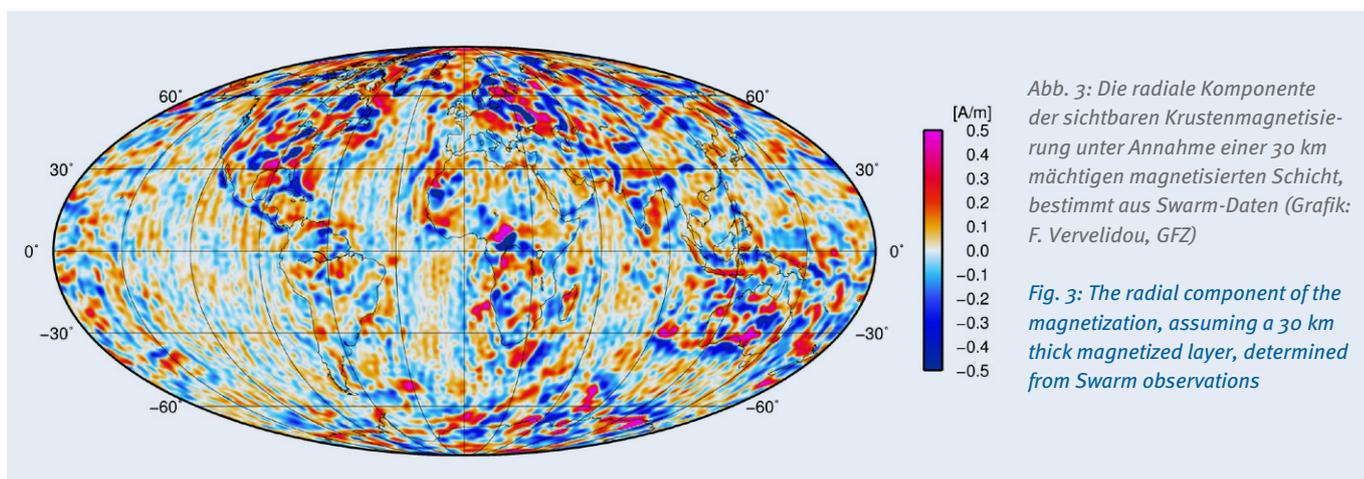


Abb. 3: Die radiale Komponente der sichtbaren Krustenmagnetisierung unter Annahme einer 30 km mächtigen magnetisierten Schicht, bestimmt aus Swarm-Daten (Grafik: F. Vervelidou, GFZ)

Fig. 3: The radial component of the magnetization, assuming a 30 km thick magnetized layer, determined from Swarm observations

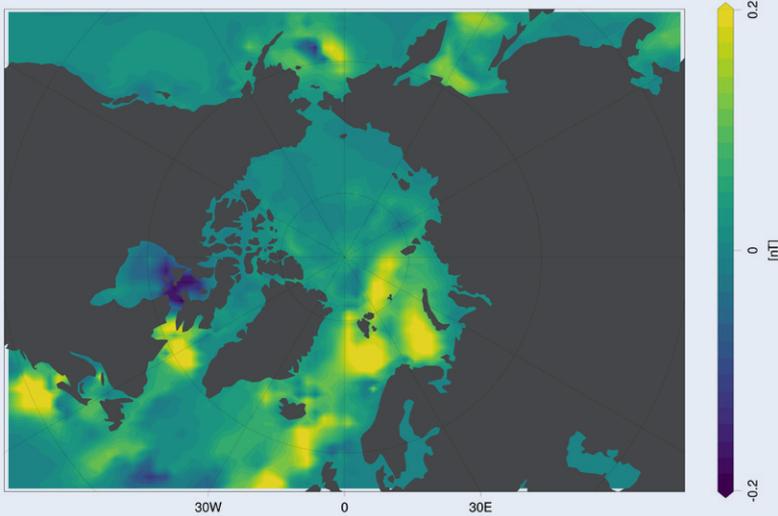


Abb. 4: Änderung der Gezeiten-Magnetfeld-Amplituden aufgrund des Temperaturanstiegs des Ozeanwassers im 21. Jahrhundert (Grafik: J. Saynisch, GFZ)

Fig. 4: Deviations in tidal magnetic field amplitudes induced by temperature enhancements of ocean water in the 21th century

Auch kleinräumige Turbulenzen im Elektronengehalt der Ionosphäre beeinflussen die satellitengestützte Navigation und Positionierung, es kann also zu Störungen von Systemen wie GPS oder Galileo kommen. Auf Swarm beobachtete Störungen des GPS-Empfangs zeigen charakteristische örtliche wie zeitliche Eigenschaften, die mit bekannten elektromagnetischen Prozessen in der Ionosphäre der polaren und der äquatorialen Breiten zusammenhängen (Abb. 5).

Teilchenstrahlung

Seit der Entdeckung der Van-Allen-Strahlungsgürtel wurde mit großem Aufwand versucht, die zugrunde liegenden Prozesse zu verstehen. Hierbei handelt es sich um Partikelstrahlung der Sonne. Die Teilchen werden durch das Erdmagnetfeld eingefan-

gen und laufen dann in Höhen von etwa 1000 bis 25 000 km in Ost-West-Richtung um die Erde. Diese Reise der Partikel kann Sekunden bis Jahre dauern. Die Dynamik der Strahlungsgürtel und ihre Reaktion auf Sonnenaktivität sind immer noch ein ungelöstes Problem der Weltraumphysik. Das Verständnis der magnetosphärischen Partikelstrahlung ist sehr wichtig, da sie ein Risiko für die Technik der in dieser Höhe fliegenden Satelliten oder auch für die bemannte Raumfahrt und den Luftverkehr darstellen.

Durch die Daten der Van-Allen-Probe-Satelliten der NASA konnten in den letzten Jahren deutliche Fortschritte zum Verständnis der Beschleunigungsmechanismen gemacht werden, die Elektronen in den Energiebereich von Megaelektronenvolt (MeV) oder sogar Multi-MeV bringen. Die Van-Allen-Probe-Satelliten fliegen nahe der Äquatorebene auf sehr elliptischen Bahnen (HEO, Highly

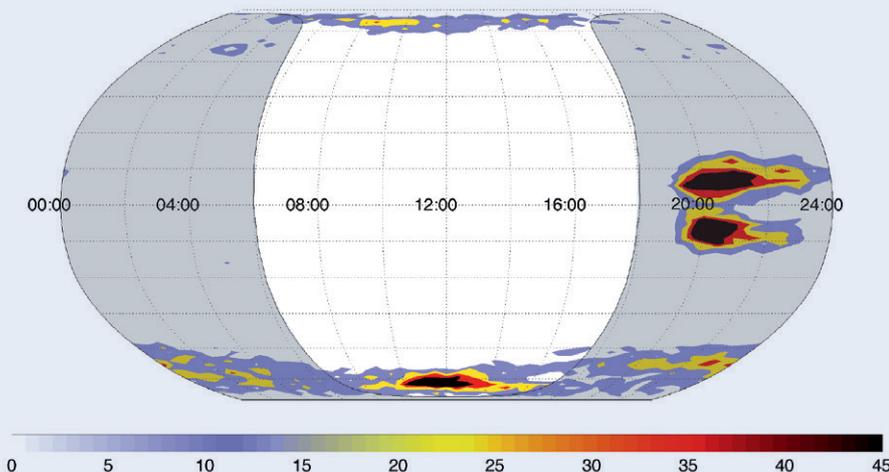
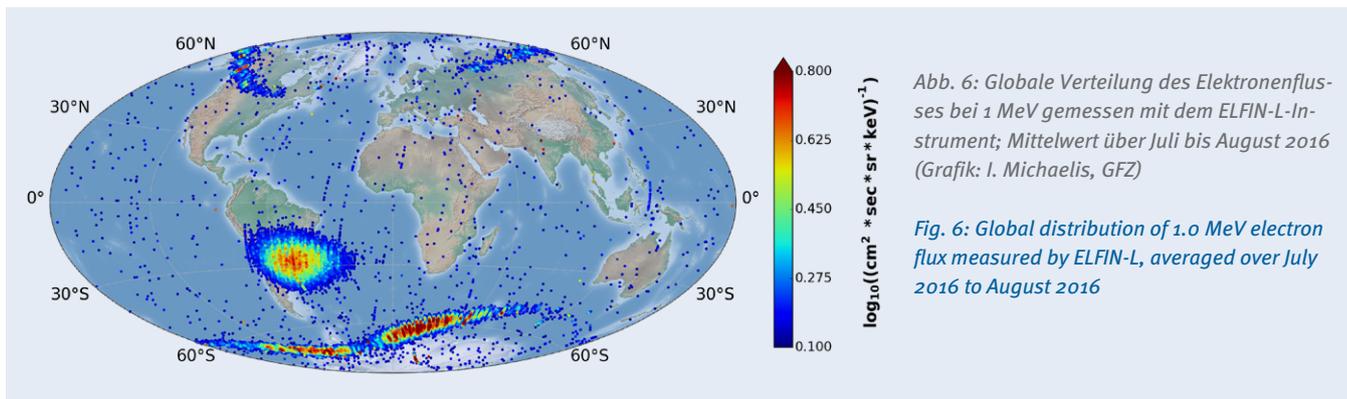


Abb. 5: Kumulierte Anzahl von GPS-Empfangsausfällen detektiert auf dem Swarm-Satelliten C über drei Jahre hinweg. Horizontale Gitterlinien repräsentieren die geomagnetische Breite und vertikale Gitterlinien die geomagnetische Ortszeit (nach Xiong et al., 2016).

Fig. 5: Accumulated number of GPS signal loss events as observed at the Swarm C GPS receiver during three years. Horizontal grid lines represent geomagnetic latitude and vertical grid lines geomagnetic local time (after Xiong et al., 2016).



Elliptical Orbits) und sind deshalb ideal geeignet, um die gesamte Population der in den Strahlungsgürteln gefangenen Partikel und ihre Beschleunigungsmechanismen zu untersuchen. Auf der anderen Seite kann von diesen HEO-Satelliten aus der Partikelverlust an die Atmosphäre nicht untersucht werden. Hierzu eignen sich nur LEO-Satelliten, da in diesen Höhenbereichen Partikel zurückgespiegelt werden, die nahe an die Atmosphäre gelangen können. Die Verlustprozesse sind nach wie vor nicht gut genug verstanden und müssen zunächst genau quantifiziert werden. Sie sind wichtig, um die nicht lineare Entwicklung der Strahlungsgürtel zu verstehen, da hier Teilchenbeschleunigung wie auch Teilchenverluste eine Rolle spielen.

Der Start des Lomonosov-Satelliten mit einer Sojus-Rakete am 28. April 2016 war der erste vom neuen russischen Wostotschny-Kosmodrom. Die Mission soll über drei Jahre Messdaten liefern. Eines der Instrumente, ELFIN-L (Electron Losses and Fields INvestigation onboard the Lomonosov satellite), dient der Bestimmung des Energiespektrums der in die Atmosphäre verlorengehenden Partikel. Die Messungen des ELFIN-L-Instruments und anderer polarer und äquatorialer LEO-Satelliten werden genutzt, um die Mechanismen zu verstehen, die zur Streuung der Strahlungspartikel in der Atmosphäre führen (Shprits *et al.*, 2017). Der Orbit des Lomonosov-Satelliten in 400 bis 500 km Höhe ist hierfür ideal geeignet.

Abbildung 6 zeigt die globale Verteilung des Elektronenflusses im 1 MeV-Bereich gemessen mit dem ELFIN-L-Instrument. Deutlich ist auch hier der Zusammenhang mit dem Erdmagnetfeld: Im Bereich der Südatlantischen Anomalie, wo das Erdmagnetfeld besonders schwach ist (siehe auch Abb. 2) und entsprechend die Rückspiegelung der gefangenen Elektronen tiefer liegt, zeigt der Elektronenfluss in Satellitenhöhe besonders hohe Werte. Die Bereiche mit hohem Elektronenfluss in Kanada, Sibirien und um die Antarktis entsprechen dem äußeren Strahlungsgürtel der Erde. Auch dieser ist in seiner Position durch die Geometrie des Erdmagnetfelds bestimmt.

Ausblick

LEO-Satellitenmissionen spielen eine zentrale Rolle in der Erforschung des Erdmagnetfelds, der Hochatmosphäre sowie der Magnetosphäre. Das GFZ engagiert sich stark bei der wissenschaftlichen Bearbeitung ihrer Messdaten. Im Besonderen wird auf die interdisziplinäre Nutzung der neuen Daten im Schwerpunktprogramm „DynamicEarth“ der DFG gesetzt, dessen zweite Finanzierungsphase im Frühjahr 2018 beginnt. Die gewonnene Expertise soll genutzt werden, neue Satellitenmissionen zu planen und durchzuführen, die offen gebliebene Fragen beantworten werden.

Literatur

- Saynisch, J., Petereit, J., Irrgang, C., Kuvshinov, A., Thomas, M. (2016): Impact of climate variability on the tidal oceanic magnetic signal - a model based sensitivity study. - *Journal of Geophysical Research*, 121, 8, pp. 5931–5941. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JCo12027>
- Saynisch, J., Petereit, J., Irrgang, C., Thomas, M. (2017): Impact of oceanic warming on electromagnetic oceanic tidal signals - a CMIP5 climate model based sensitivity study. - *Geophysical Research Letters*, 44, 10, pp. 4994–5000. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL073683>
- Shprits, Y. (2017): Editorial: Topical Collection on the Lomonosov Mission. - *Space Science Reviews*, 212, 3-4, pp. 1685–1686. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0393-1>
- Stolle, C., Olsen, N., Richmond, A. D., Opgenoorth, H. J. (2017): Editorial: Topical Volume on Earth's Magnetic Field—Understanding Geomagnetic Sources from the Earth's Interior and Its Environment. - *Space Science Reviews*, 206, 1, pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0346-8>
- Vervelidou, F., Thébault, E. (2015): Global maps of the magnetic thickness and magnetization of the Earth's lithosphere. - *Earth Planets and Space*, 67, 173. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0329-5>
- Xiong, C., Stolle, C., Lühr, H. (2016): The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities. - *Space Weather*, 14, 8, pp. 563–577. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001439>

Satellitenfernerkundung von Landoberflächen – Beginn einer neuen Ära

Daniel Spengler, Robert Behling, Sabine Chabrillat, Hannes Diedrich, Doris Dransch, Saskia Förster, Mahmud H. Haghighi, André Hollstein, Sibylle Itzerott, Theres Kuester, Christian Mielke, Robert Milewski, Mahdi Motagh, Sigrid Roessner, Daniel Scheffler, Mike Sips, Karl Segl, Alexandra Wolanin, Luis Guanter
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Satellite remote sensing offers the possibility to continuously, globally collect information about Earth's surface properties, and thus possesses an enormous scientific and economic potential. The spatio-temporal recording of information opens up a wide range of possibilities for large-scale monitoring of changes and influencing factors, e.g. in atmospheric research, agriculture and forestry, geology, urban areas and the analysis of natural hazards. The European Union's Copernicus programme marks the beginning of a new era in satellite-based Earth observation by designing and launching the Sentinel series, an operational fleet of high-continuity, multi-combinable observation systems. This enables completely new objects of investigation, but also requires a new level of automated data processing in order to make the huge amounts of data available for analysis. This article provides an insight into current remote sensing research at the GFZ. First, it presents the activities related to the creation of preprocessing standards and interfaces for data evaluation, geo-data management and visualization. In the following, examples for multi-sensor analysis of land use potentials and natural hazards are shown, in order to finally discuss the role of the GFZ in the development of hyperspectral satellite missions and related data analysis.



Einführung in die satellitengestützte Erdbeobachtung

Die Landoberfläche der Erde ist Lebensraum von derzeit 7,5 Milliarden Menschen. Sie ist ständigen Veränderungen unterworfen, wobei die menschliche Nutzung den dynamischsten Faktor darstellt. Die nachhaltige Nutzung der Ressource Landoberfläche ist von zentraler Bedeutung für unsere Zukunft und erfordert detaillierte Kenntnisse über Zustand und Veränderungen des menschlichen Lebensraums. Die Satellitenfernerkundung bietet die Möglichkeit, Veränderungen der Erdoberfläche kontinuierlich und global zu erfassen und besitzt dadurch ein enormes wissenschaftliches und ökonomisches Potenzial.

Die zahlreichen zur Verfügung stehenden Systeme zur Erdbeobachtung aus dem All erlauben z. B. Anwendungen in den Bereichen Atmosphärenforschung, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Geowissenschaften, Naturgefahren und urbane Räume. Je nach Anwendungsgebiet werden Daten von unterschiedlichen Satellitensystemen genutzt, wobei die optischen Systeme und die Radarsysteme (SAR) die beiden Haupttechnologien der satellitengestützten Erdbeobachtung darstellen. Mit den optischen Multispektralsatelliten des EU/ESA-Copernicus-Programms und des USGS/NASA-Landsat-Programms stehen für die verschiedenen Anwendungsgebiete leistungsfähige Satellitensysteme zur Verfügung, deren Daten weltweit kostenfrei genutzt werden können. In Kombination mit einer Vielzahl weiterer Satellitensysteme ermöglichen sie eine kontinuierliche Erdbeobachtung in unterschiedlichen Maßstäben innerhalb der atmosphärischen Fenster. In diesen Fenstern wird die elektromagnetische Strahlung der Sonne durch die Atmosphäre kaum beeinflusst und kann daher für die optische Auswertung von Fernerkundungsdaten genutzt werden.

Am Anfang jeder fernerkundlichen Fragestellung steht die Auswahl von geeigneten Satellitendaten. Dabei ergeben sich unterschiedliche Optionen sowohl aus der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Systeme als auch aus den abbildbaren Eigenschaften der Erdoberfläche, wobei letztere durch das jeweils zum Einsatz kom-

mende fernerkundliche Messprinzip bestimmt werden. In der Regel stellt diese Auswahl einen Kompromiss zwischen räumlicher Auflösung (wenige Zentimeter bis mehrere Kilometer) und damit verbundener zeitlicher Wiederholrate (mehrmals täglich bis monatlich) dar. Im Bereich der optischen Fernerkundung verfügen räumlich sehr hoch auflösende Systeme (< 2 m) nur über wenige (< 10) spektral breite Kanäle (z. B. Quickbird, WorldView-2). Räumlich schlechter auflösende Systeme (> 10 m) besitzen hingegen deutlich mehr (> 10 bis rund 250) spektral höher auflösende Kanäle (z. B. Sentinel-2, EnMAP). Abbildung 1 verdeutlicht die Lage der Spektralkanäle wichtiger Aufnahmesysteme. Die zeitliche Auflösung der Systeme kann durch den Einsatz mehrerer baugleicher Satelliten erhöht werden. Beispiele dafür sind die Sentinel-1/2-Systeme mit jeweils zwei Satelliten (A/B), RapidEye mit fünf Satelliten und im Bereich der CubeSats die Planet-Labs-Konstellation mit mehr als einhundert Kleinsatelliten.

Entwicklungsgeschichte der Satellitenbeobachtung der Landoberfläche

Das Landsat-Programm des USGS (United States Geological Survey) ist das am längsten im kontinuierlichen operationellen Einsatz befindliche Erdbeobachtungsprogramm. Seit 1972 zeichnen die optischen Satelliten des Landsat-Programms multispektrale Daten der Erdoberfläche auf und ermöglichen damit globale Veränderungsanalysen über mehrere Jahrzehnte. Seit dieser Anfangszeit haben sich die technischen Möglichkeiten der Satelliten enorm weiterentwickelt. Die ersten Landsat-Satelliten (1 bis 3) besaßen vier Spektralkanäle (Grün, Rot, nahes Infrarot 1 und nahes Infrarot 2) bei einer räumlichen Auflösung von 79 x 79 m². Der aktuelle Landsat-8-Satellit besitzt hingegen eine räumliche Auflösung von 30 x 30 m² und elf Spektralkanäle. Ein weiteres vielgenutztes optisches Satellitensystem ist das Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), das 35 Spektralkanäle im Wellenlängenbereich von 0,4 bis 14,4 µm und eine räumliche Auflösung von bis zu 250 m hat. Die Daten und daraus abgeleitete Produkte dieses NASA-Satelliten ermöglichen seit 1999 eine zeitlich hochauflösende globale Erdbeobachtung.

Neben den optischen Satelliten können auch Radarsatellitensysteme, die mit Wellenlängen im Zentimeterbereich arbeiten (Abb. 1), auf eine fast 40-jährige Entwicklungsgeschichte zurückblicken. Sie begann 1978 mit Seasat zur Überwachung der Meere. Die Tandemkonstellation der ESA-Satelliten ERS-1 und ERS-2 ermöglichte erstmals die Aufnahme interferometrischer Daten und damit die Erfassung von Bewegungen (Hebungen und Senkungen) der Erdoberfläche im Zentimeterbereich. Eine Fortsetzung fand dieses System u. a. in den deutschen TerraSAR-X- und TanDEM-X-Missionen, wobei letztere die Datengrundlage zur Erzeugung eines hochgenauen weltweiten 3D-Modells der Erdoberfläche geschaffen hat.

Links: Potsdam und sein Umland aus dem All (Copernicus-Sentinel-2-Aufnahme vom 27. Mai 2017)

Left: Potsdam and its surrounding from space (Copernicus Sentinel-2 image from 27 May 2017)



Kontakt: D. Spengler
(daniel.spengler@gfz-potsdam.de)

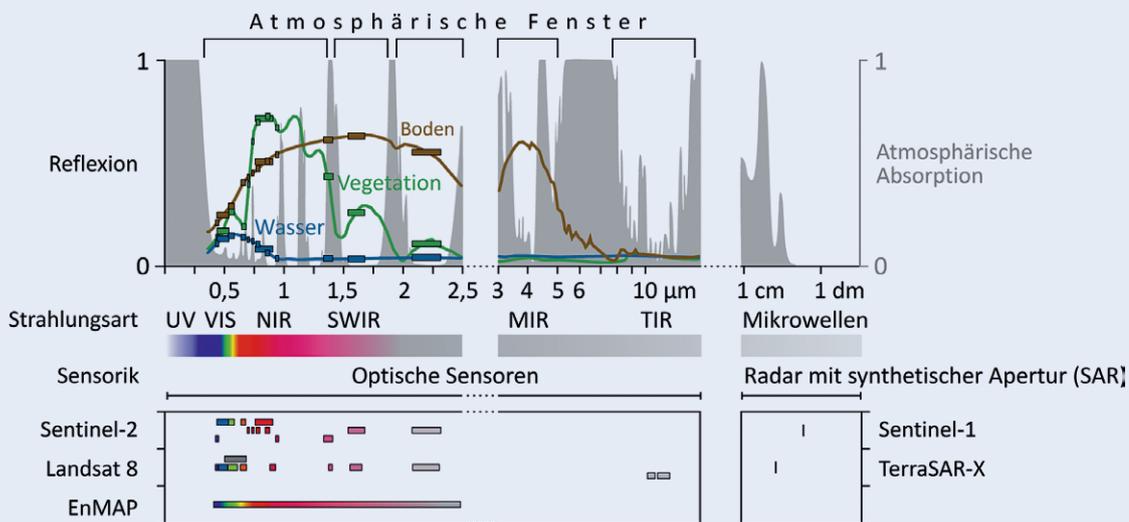


Abb. 1: Spektralsignatur von Boden, Vegetation und Wasser in hyperspektraler (Linie) und multispektraler (Balken) Auflösung in Bezug auf die Lage und spektrale Auflösung optischer (Sentinel-2, Landsat 8 und EnMAP) und SAR-Systeme (Sentinel-1 und TerraSAR-X). VIS – sichtbares Licht, NIR – nahes Infrarot, SWIR – kurzwelliges Infrarot, MIR – mittleres Infrarot, TIR – thermales Infrarot

Fig. 1: Spectral signature of soil, vegetation and water in hyper-(line) and multi-(boxes) spectral resolution in relation to the position and spectral resolution of optical (Sentinel-2, Landsat 8 and EnMAP) and SAR systems (Sentinel-1 and TerraSAR-X). VIS – visible light, NIR – near infrared, SWIR – shortwave infrared, MIR – midwave infrared, TIR – thermal infrared

Das Copernicus-Programm der EU – eine neue Dimension der Erdbeobachtung

Mit dem Copernicus-Programm der EU hat eine neue Ära in der satellitengestützten Erdbeobachtung begonnen. Das Programm wurde 1998 gemeinsam von der Europäischen Kommission und der ESA mit dem Ziel konzipiert, eine kostenfrei zugängliche und leistungsfähige Infrastruktur für die Erdbeobachtung zu schaffen. Das Programm umfasst eine Vielzahl von Satellitensystemen (Sentinel-Missionen) mit unterschiedlichen Schwerpunkten, die alle auf eine hohe zeitliche Wiederholrate ausgerichtet sind. Copernicus hat neben der Bereitstellung von Satellitendaten für umwelt- und sicherheitsrelevante Fragestellungen auch die Verknüpfung dieser Informationen mit anderen Erdbeobachtungen im Rahmen der Copernicus-Dienste zum Ziel, z. B. für die Überwachung der Atmosphäre, der Landoberfläche und der Meeresumwelt, zur Unterstützung des Katastrophen- und Krisenmanagements sowie für Sicherheitsanwendungen. Diese Dienste sollen in Zukunft die Behörden der EU-Mitgliedsstaaten maßgeblich in ihren Monitoring- und Planungsaufgaben sowie darauf aufbauenden Entscheidungsfindungen unterstützen.

Im Vergleich zu früheren Satellitenmissionen liegt ein großer Mehrwert der Sentinel-Daten in ihrer vergleichsweise hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung. So erfasst das Sentinel-1A/B-System (Radarmission) die Erdoberfläche in einer Auflösung von bis zu 5 x 20 m² mit einer Wiederholrate von bis zu sechs Tagen (Abb. 2a). Das optische Sentinel-2A/B-System erfasst die Erdoberfläche in 13 spektralen Kanälen mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 m und einer Wiederholrate von bis zu fünf Tagen (Abb. 2b, 2c). Allein die Sentinel-1-, Sentinel-2- und Sentinel-3-Missionen generieren ein tägliches Datenvolumen von mehr als 20 Terabyte. Für diese enormen Datenmengen sind neue Prozessierungs- und Auswerteverfahren erforderlich, um die Daten schnell aufzuberei-

ten und operationell für raumzeitliche Analysen in verschiedenen Anwendungsfeldern nutzbar zu machen.

Während inzwischen vier der sechs für die erste Projektphase konzipierten Systeme im All sind und die baugleichen Nachfolgersysteme auf ihren Einsatz warten, werden weitere Missionen mit neuen Aufnahmekonstellationen (Wellenlängen, Wiederholraten, Bildstreifenbreiten) geplant. Unter anderem soll mit Sentinel-10 eine Hyperspektralmission entwickelt werden, die anders als die Multispektralmissionen das gesamte Reflexionsspektrum im Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 nm spektral hoch aufgelöst aufzeichnet und damit exzellente Möglichkeiten zur spektralen Objektidentifikation bietet. Bei der Realisierung dieses Vorhabens wird die deutsche Hyperspektralmission EnMAP (Abb. 1, weitere Informationen ab Seite 46) unter der wissenschaftlichen Leitung des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ einen grundlegenden Beitrag für das Systemdesign und die Implementierung von Datenvorprozessierungs- und Auswerteargorithmen leisten.

Ausgewählte Forschungsschwerpunkte am GFZ

Die wachsende Zahl an Satellitenmissionen zur Erdbeobachtung, die dichteren Wiederkehrzeiten und die Verwendung verschiedener Sensoren führt zu großen Datenmengen, die verarbeitet werden müssen. In den frühen Jahren der Fernerkundung wurden die Informationen aus einer einzigen Aufnahme gewonnen, heute verwendet man lange Zeitreihen und kombiniert die Daten unterschiedlicher Missionen. Das verbessert einerseits die Güte des Ergebnisses, andererseits vervielfacht sich der Aufwand für die Datenverarbeitung. Eine essenzielle Grundlage für die Auswertung von Fernerkundungsdaten ist die Datenvorprozessierung. Hierbei werden die am Satelliten gemessenen Signale hinsichtlich sensorbedingter und atmosphärischer Einflüsse korrigiert und räumlich verortet. Die Datenvorprozessierung, die noch vor fünf Jahren

die meisten Forschenden selbst durchgeführt haben, erfolgt heute meist automatisch. Dazu werden neue Algorithmen entwickelt, mit denen Informationen aus vielen sehr unterschiedlichen Daten gewonnen werden können. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der GFZ-Sektionen Fernerkundung und Geoinformatik entwickeln daher Lösungen sowohl für die Datenvorprozessierung als auch für die Informationsgewinnung. Im Folgenden werden zunächst zwei Verfahren zur Auswahl von Multisensordaten und homogenisierten Bereitstellung sowie zur sensorspezifischen (Sentinel-2) Datenprozessierung vorgestellt. Beide sollen Eingang in Datensuchportale finden, die Nutzern anwendungsorientierte Daten anbieten. Beispiele für die Extraktion von Zustands- und Prozessmerkmalen aus Satellitendaten werden anschließend für die Themenfelder Landwirtschaft, Naturgefahren und Ressourcenanalyse gezeigt. Abschließend wird die Beteiligung des GFZ bei der Definition und Entwicklung zukünftiger Sensorsysteme (EnMAP) und der dazugehörigen Datenauswertung skizziert.

GeoMultiSens – BigData-fähiges System zur Vorprozessierung von Multisensor-Satellitendaten

Die Nutzung verschiedener optischer Fernerkundungssysteme vergrößert die Anzahl von Satellitenaufnahmen, die für Analysen von raumzeitlichen Veränderungen zur Verfügung stehen. Dabei kann zum einen die Wiederholrate der Aufnahmen erhöht und zum anderen der Beobachtungszeitraum verlängert werden, wodurch aussagefähigere Untersuchungen möglich sind. Für solche Multisensoranalysen ist ein gemeinsames Referenzmodell wichtig, in das alle vorhandenen Erdbeobachtungsdaten überführt werden. Überdies ist für Multisensoranalysen eine Homogenisierung von räumlichen und spektralen Eigenschaften der Fernerkundungsdaten aus verschiedenen Satellitenmissionen mit unterschiedlichen Sensorparametern notwendig. Die aufgrund der neuen Satellitenmissionen immer schneller wachsenden Datenmengen stellen dabei eine besondere Herausforderung dar. Sie erfordern die Entwicklung sogenannter „BigData“-fähiger Ver-

fahren, die Prozessierung und Analyse von Satellitendaten in der Größenordnung von Petabytes ermöglichen.

An dieser Stelle setzt das Verbundprojekt GeoMultiSens (www.geomultisens.de) im Rahmen der BMBF-High-Tech-Strategie „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ an. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Open-Source-Softwaresystems zur Multisensoranalyse von optischen Fernerkundungsdaten. Dabei arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Fernerkundung und Informatik am GFZ mit Partnern der Humboldt-Universität zu Berlin und des Zuse-Instituts Berlin gemeinsam an einem innovativen, BigData-fähigen System. Die darin integrierten und automatisierten Prozessierungs- und Analyseprozesse umfassen mehrere Teilschritte (Module).

Der erste Schritt ist die Satellitendatenauswahl, die mit Hilfe eines webbasierten Interfaces (Abb. 3) erfolgt. Unterstützt von Werkzeugen zur visuellen Exploration ermöglicht es, Satellitendaten aus den Archiven der verschiedenen Missionen anhand von Metadaten, wie z. B. Wolkenbedeckungsgrad oder räumliche und zeitliche Abdeckung, zu vergleichen, um dann für die weitere Prozessierung eine Auswahl zu treffen.

Das sich daran anschließende Modul zur Datenhomogenisierung umfasst eine Vielzahl von Prozessierungsschritten. Zunächst werden die Metadaten homogenisiert, danach die Bilddaten geometrisch an eine räumliche Referenz mit Hilfe des AROSICS-Algorithmus angepasst (Scheffler et al., 2017) und abschließend mit Hilfe von Strahlungstransferberechnungen in Oberflächenreflektanzen transformiert. In diesem Prozess werden die ursprünglich heterogenen Bilddaten auf einen benutzerdefinierten, einheitlichen Sensor abgebildet. Das bedeutet, dass die Daten unterschiedlicher Satelliten nun eine einheitliche räumliche und spektrale Auflösung besitzen und damit für Zeitreihenanalysen miteinander kombiniert werden können. Da dies in der Regel nicht fehlerfrei erfolgen kann, werden zusätzlich zu den homogenisier-

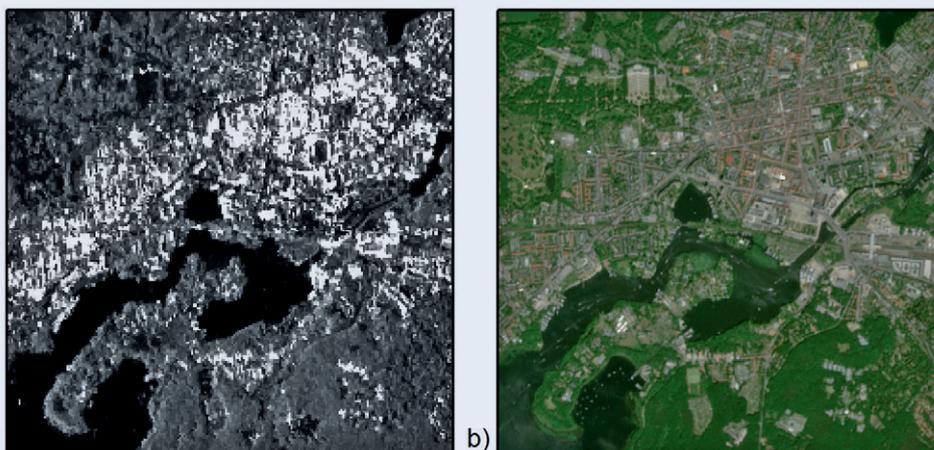


Abb. 2: Sentinel-1(S1)- und Sentinel-2(S2)-Daten von Potsdam: a) S1, multitemporal gefilterter Datensatz, b) S2, vom 27. Mai 2017, Echtfarbdarstellung

Fig. 2: Sentinel-1 and Sentinel-2 data of Potsdam: a) S1 multitemporal filtered data, b) S2, 27 May 2017 true colour image

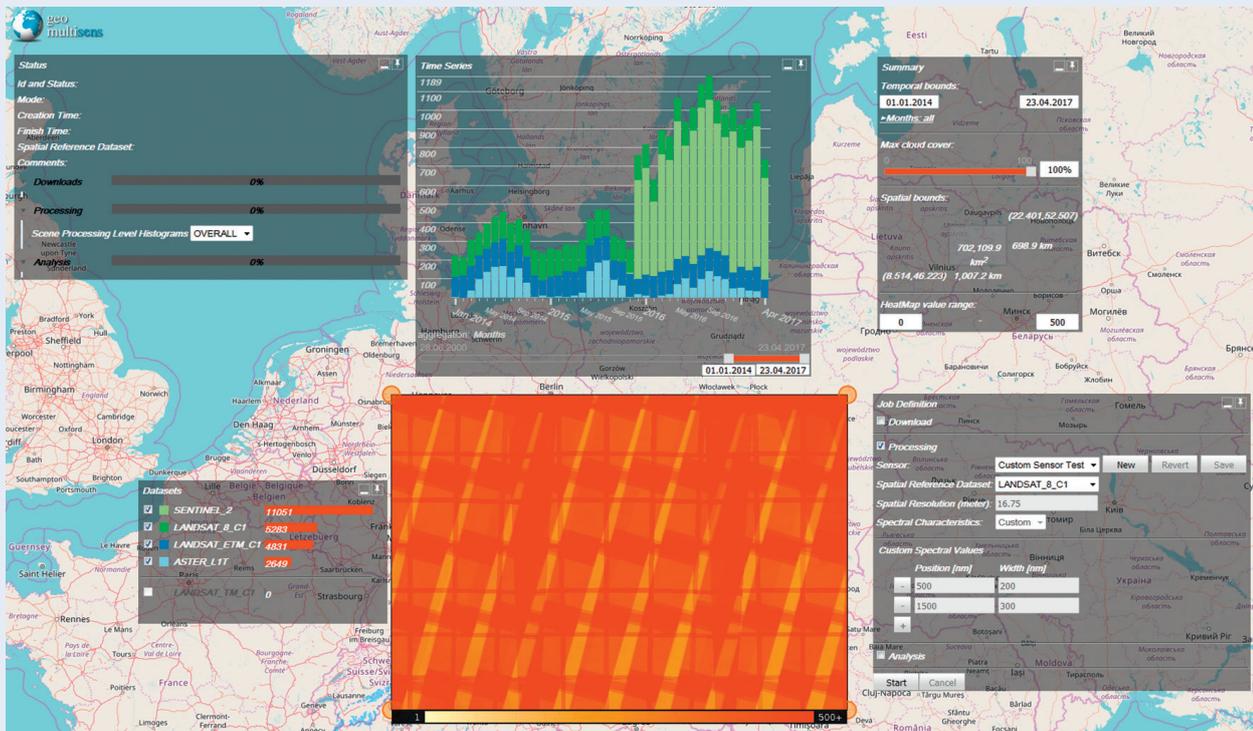


Abb. 3: Webbasiertes Interface von GeoMultiSens zur Selektion von Multisensordaten

Fig. 3: Web-based interface of GeoMultiSens used for the selection of multi-sensor data

ten Multisensordaten Genauigkeitsinformationen erzeugt. Das sich daran anschließende Analysemodul stellt Operatoren bereit, die mit Hilfe von BigData-fähigen Verfahren aus der Informatik eine schnelle Analyse sehr großer Datenmengen ermöglichen. Mit Hilfe des Explorationsmoduls (QGIS-Plugin) können die Ergebnisse visualisiert und interaktiv analysiert werden, um sie weiterführend zu interpretieren und zu bewerten. Alle Module sind in einer integrierten Prozesskette miteinander verbunden und können über ein einheitliches, webbasiertes Interface bedient werden.

GTS2 – System zur Vorprozessierung und Speicherung von Sentinel-2-Daten

Speziell für die Vorprozessierung von Copernicus-Sentinel-2-Daten wurde von der GFZ-Sektion Fernerkundung das „GFZ Time Series System for Sentinel-2“ (GTS2) entwickelt. Das System prozessiert sämtliche für Deutschland zur Verfügung stehenden Sentinel-2-Daten und archiviert sie in einer Datenbank in Form von wolkenmaskierten, atmosphärisch korrigierten und geometrisch angepassten Level-2A-Datenprodukten. Der Datenzugriff auf die erzeugten Reflektanzdaten erfolgt über eine webbasierte Programmierschnittstelle (API), die sowohl eine räumlich und zeitlich flexible Auswahl der Datenprodukte als auch die Bereitstellung deutschlandweiter Informationen ermöglicht.

Abbildung 4 zeigt als beispielhafte Ergebnisse zwei wolkenfreie Mosaik aus Sentinel-2-Daten von drei Monaten. Die hohe zeitliche Auflösung von Sentinel-2 ermöglicht die Erzeugung solcher multitemporaler Datenkomposite, auf deren Grundlage eine flächendeckende deutschlandweite Ableitung von Informationen erfolgen kann. Die zeitliche Zusammenfassung der Satellitenda-

ten über einen längeren Zeitraum (z. B. drei Monate) ist für Anwendungen geeignet, bei denen das Ergebnis nicht von jahreszeitlichen Veränderungen beeinflusst wird, wie beispielsweise die Analyse des Versiegelungsgrads von urbanen Räumen. Je nach Anwendung können die Zeiträume zu kombinierender Daten variieren. In Zukunft soll das Verfahren zur Erzeugung zeitlicher Komposite so weiterentwickelt werden, dass die Ergebnisse auch für jahreszeitlich sensitive Fragestellungen verwendet werden können, wie z. B. die deutschlandweite Analyse des Anbaus verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen. Die dabei ableitbaren Informationen sind sowohl agrarökonomisch als auch für den Naturschutz relevant und könnten über einen längeren Zeitraum (mehrere Jahre) erfasst werden.

Fernerkundliche Analyse von Naturgefahren

Weltweit nimmt die Bedrohung des menschlichen Lebensraums durch Naturgefahren wie z. B. Hangrutschungen und Erdbeben immer stärker zu, wobei die Ursachen sowohl in der zunehmenden Besiedlung als auch in den sich verändernden Umweltbedingungen liegen. Damit erhöht sich die Bedeutung eines nachhaltigen Gefahrenmanagements, das auf eine schnelle Reaktion im Katastrophenfall ebenso wie auf langfristige Vorbereitung und Vorsorge ausgerichtet ist. Satellitenfernerkundung trägt bereits auf vielfältige Weise zur Entwicklung von effektiven und weltweit einsetzbaren Strategien zur Risikominimierung bei, wobei sich mit dem europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus völlig neue Möglichkeiten eröffnet haben. Der global freie Zugang zu den zeitlich und räumlich hochauflösenden Sentinel-1/2-Daten schafft die Grundlage für ein großräumiges und kontinuierliches Monitoring von potenziell gefährlichen natürlichen Prozessen

und ihren Auswirkungen auf den menschlichen Lebensraum. Die Kombination dieser Daten mit den mehrere Jahrzehnte zurückreichenden, frei verfügbaren Landsat-Archiven und Daten anderer Satellitenmissionen (z. B. RapidEye, ALOS, TerraSAR-X) ermöglicht ein langfristiges Monitoring als Voraussetzung für eine differenzierte raumzeitliche Prozessanalyse, die wiederum die Grundlage für eine objektive und dynamische Gefährdungseinschätzung bildet.

Die Satellitenfernerkundung kann beispielsweise für eine großräumige Analyse der Hangrutschungsgefährdung eingesetzt werden. Dabei ist eine möglichst genaue raumzeitliche Rekonstruktion der Hangrutschungsaktivität wichtig. Die dafür am GFZ entwickelte automatische Methode (Behling et al., 2016) erlaubt die großräumige und langfristige Rekonstruktion einer Hangrutschung. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Anwendung dieser

Methodik auf ein mehr als 10 000 km² großes Gebiet in Südkirgisistan, das von starker Hangrutschungsaktivität betroffen ist. Räumlich und zeitlich hochauflösende RapidEye-Daten, die im Rahmen des vom DLR geförderten RESA-Programms zur Verfügung gestellt wurden, bildeten die Grundlage für eine automatische Zeitreihenanalyse, in deren Ergebnis flächengenaue Hangrutschungsobjekte abgeleitet wurden (Behling et al., 2016; Behling et al., 2017).

Die weiterführende Analyse der in Abb. 4 dargestellten großräumigen multitemporalen Hangrutschungsentwicklung zeigt, dass selbst der relativ kurze Zeitraum von nur sieben kompletten Beobachtungsjahren (2010 bis 2016) sowohl durch starke räumliche als auch zeitliche Unterschiede in der Hangrutschungsaktivität gekennzeichnet ist (Behling et al., 2017). Dabei hat das automatische Verfahren erstmals eine nahezu vollständige

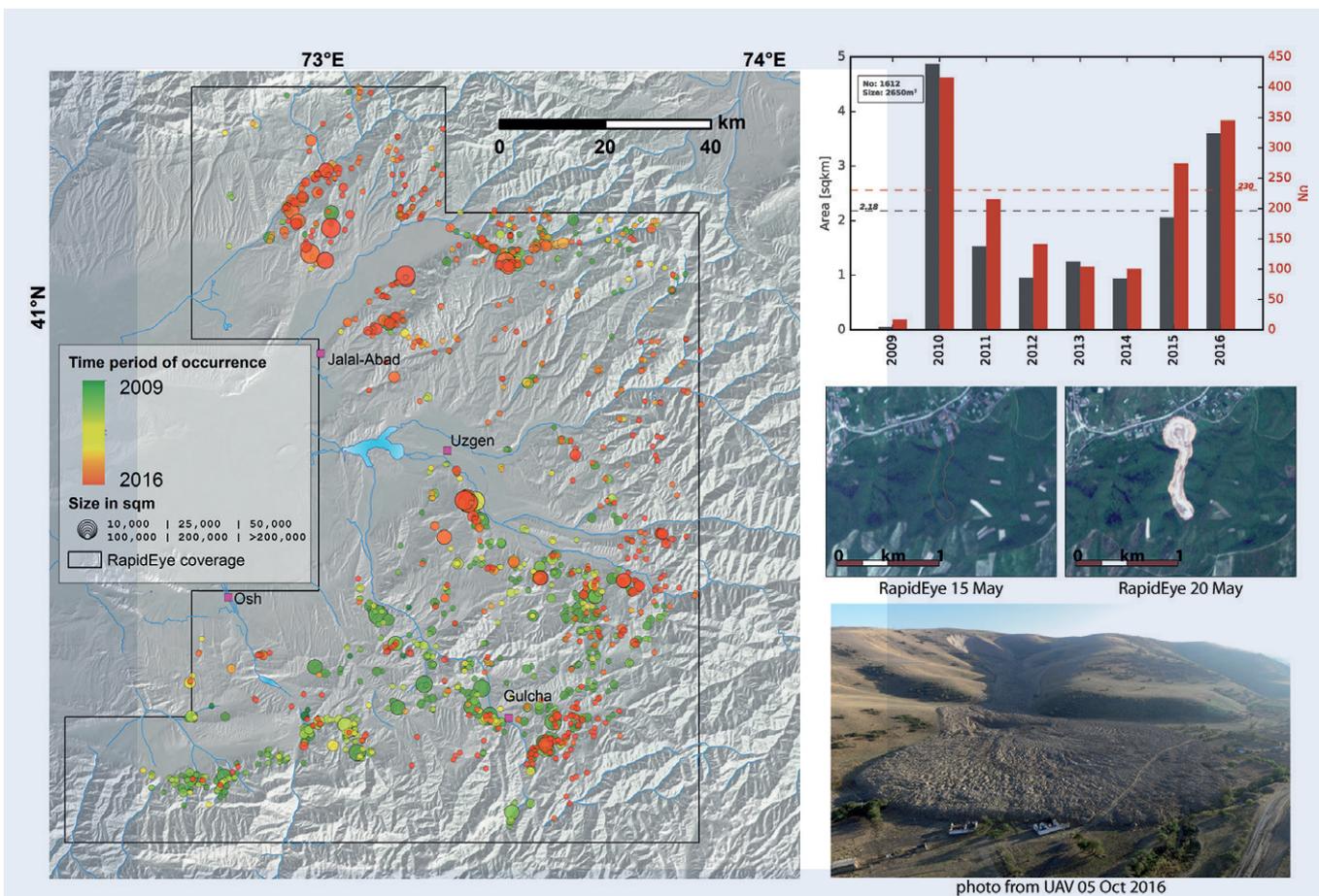


Abb. 4: Links: Automatische raumzeitliche Detektion von Hangrutschungsobjekten in Südkirgisistan im Zeitraum von 2009 bis 2016 auf der Basis von Datenzeitreihen der RapidEye-Satelliten. Oben rechts: Jährliche Summenstatistik nach Fläche (schwarz) und Anzahl (rot) der Hangrutschungen. Unten rechts: Beispiel für automatisch detektierte Hangrutschung (Foto: R. Behling, GFZ)

Fig. 4: Left: Automated spatio-temporal detection of landslide objects in southern Kyrgyzstan for the time period 2009 to 2016 based on time series of RapidEye satellite remote sensing data. Upper right: Annual cumulative statistics according to area (black) and number (red) of landslides. Lower right: Example of automatically detected landslide object

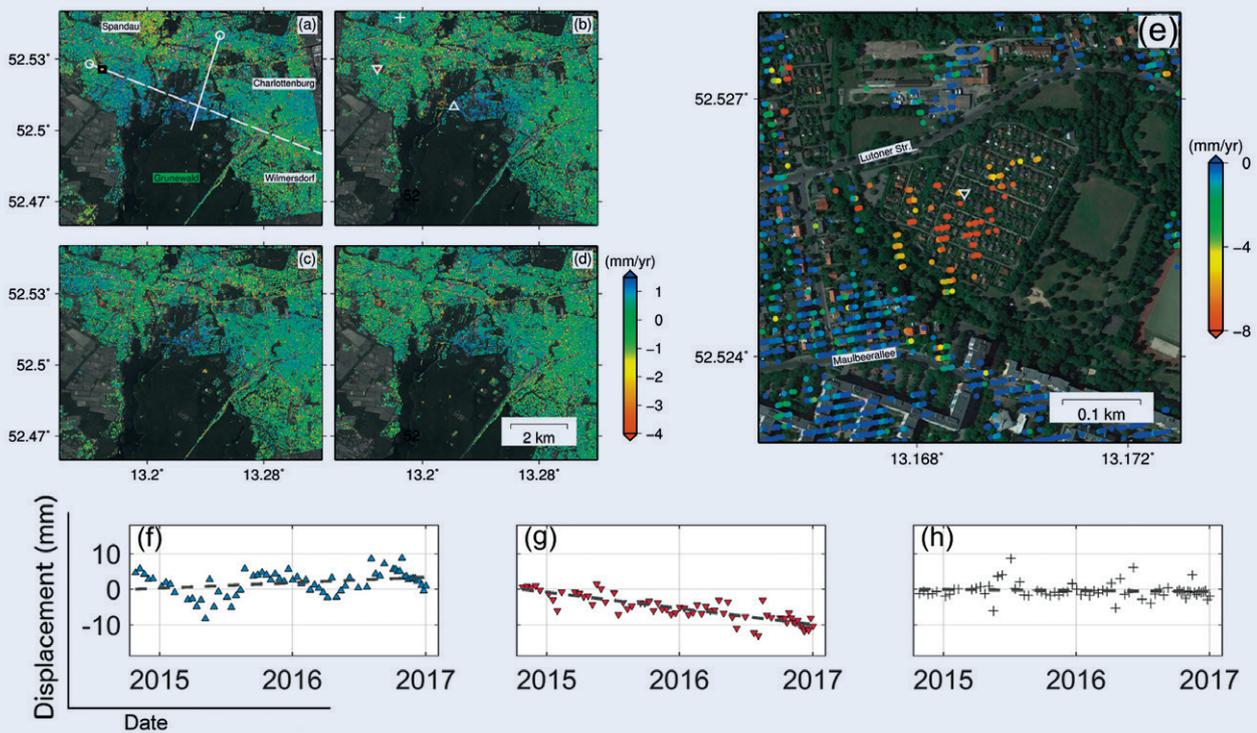


Abb. 5: Ergebnisse einer Persistent-Scatterer-InSAR-Analyse von Sentinel-1-Daten zu saisonalen Hebungen und Senkungen am Nordende des Grunewalds als Folge unterirdischer Gasspeicherung (oben links und Darstellungen unten), sowie Senkungsereignisse aufgrund von Kompaktierung und Setzung deponierter Massen im Bereich einer Kleingartenanlage (rechts)

Fig. 5: Results of a Sentinel-1 data Persistent Scatterer InSAR analysis of seasonal uplift and subsidence at the northern end of Grunewald, Berlin, due to subterraneous gas storage (top, left and bottom) as well as subsidence events due to compaction of dumped masses in a small garden area (right)

Erfassung aller Hangrutschungsobjekte unabhängig von ihrer Größe und ihrem Auftretensort ermöglicht. Die daraus resultierende GIS-basierte Datenbank konnte erfolgreich sowohl für die weiterführende Analyse von Hangrutschungseigenschaften als auch für die Ableitung einer großräumigen Gefährdungseinschätzung eingesetzt werden (Golovko et al., 2017). Die inzwischen global verfügbaren Sentinel-2-Daten ermöglichen eine Übertragbarkeit der entwickelten Methodik auf andere gefährdete Regionen, wie bereits für Untersuchungsgebiete in Nepal und in Neuseeland gezeigt werden konnte (Behling et al., 2017).

Satellitengestützte Potenzialanalyse zur Ressourcennutzung

Sowohl optische als auch Radarsatellitendaten können auf vielfältige Weise für die Analyse von Nutzungspotenzialen und die Beobachtung von Umweltveränderungen, die durch menschliche Nutzung hervorgerufen werden, eingesetzt werden. Im Folgenden werden am GFZ durchgeführte Studien zur Detektion von Hebungs- und Senkungsprozessen in urbanen Räumen, zur Analyse von Boden- und Vegetationszuständen in landwirtschaftlich genutzten Gebieten und zur Erkundung von mineralischen Rohstoffen beispielhaft vorgestellt.

InSAR-basierte Analyse von Oberflächendeformationen im Stadtgebiet von Berlin

Mit InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ist es möglich, auf der Basis von Radarzeitreihendaten topographische

Veränderungen der Erdoberfläche im Zentimeterbereich zu detektieren. Durch die Verfügbarkeit der zeitlich hochauflösenden Daten der Sentinel-1-Radarmission ergeben sich neue Möglichkeiten für die Analyse von Positionsveränderungen von Objekten an der Erdoberfläche. Sie umfassen sowohl kurzfristig durch Einzelereignisse hervorgerufene Dislokationen als auch die Beobachtung von Langzeittrends und saisonalen Dynamiken. In einer Studie konnten mit InSAR für Teile des Stadtgebiets von Berlin Hebungs- bzw. Senkungsprozesse in der Zeit zwischen Oktober 2014 bis Januar 2017 nachgewiesen werden (Haghscheinas Haghighi und Motagh, 2017). Dafür wurden vier Zeitreihen von Sentinel-1-Daten mit der Persistent-Scatterer-InSAR-Methode analysiert. Bei den exemplarisch in Abb. 5 dargestellten Ergebnissen steht die grüne Einfärbung für eine unveränderte Höhenlage der Objekte während des Untersuchungszeitraums, blau bedeutet Hebung und rot Absenkung des Gebiets. In der Bildmitte am Nordende des Grunewalds wurden langfristige Hebungen von durchschnittlich 2 mm pro Jahr sowie saisonale Schwankungen von bis zu 2 cm festgestellt. Sie stehen im Zusammenhang mit dem Untergrundgasspeicher bei Spandau und werden durch die Gaseinspeicherung und -entnahme hervorgerufen. Im Nordwesten des dargestellten Stadtausschnitts konnten langfristige Senkungstendenzen nachgewiesen werden, die auf das Areal einer Kleingartenanlage beschränkt sind (Abb. 5 rechts). Hier befindet sich im Untergrund eine Schutt- und Mülldeponie, die nach dem Zweiten Weltkrieg angelegt wurde. Die ermittelten Absenkungsraten von etwa 8 mm pro Jahr stehen im Zusammenhang mit fortschreitender Kompaktion und Setzung der bis 1970

deponierten Massen. Aufgrund der Studie ist mit dem Berliner Senat für die kommenden Jahre die Fortsetzung des satellitengestützten Monitorings und die Kombination mit bodengestützten Beobachtung vereinbart worden.

Fernkundliche Analyse von Landwirtschaftsgebieten

Im Bereich der Landwirtschaft ermöglichen die aktuell verfügbaren Satellitensysteme thematisch breit gefächerte Anwendungen zur Analyse von Vegetation, Boden und hydrologischen Faktoren. Im Folgenden wird beispielhaft die fernerkundungsbasierte flächenhafte Bestimmung der organischen Oberbodensubstanz in Verbindung zur pflanzlichen Bruttoprimärproduktion (GPP) für das Untersuchungsgebiet DEMMIN (Durable Environmental Multidisciplinary Monitoring Information Network) vorgestellt. DEMMIN ist Bestandteil des am GFZ koordinierten Umweltobservatoriums „TERrestrial Environmental Observatories – NordOstdeutsches Tiefland“ (TERENO Nord-Ost) und offizielles deutsches Testgebiet des Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring (JECAM) und wird gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben.

Die Studie nutzt sowohl multitemporale RapidEye-Satellitenbilddaten mit einer räumlichen Auflösung von $6,5 \times 6,5 \text{ m}^2$ als auch aktuelle Sentinel-2-Daten. Aus mehrjährigen Datenreihen der RapidEye-Satelliten wurden pro Feld alle Datensätze extrahiert, die keine oder nur eine sehr geringe Vegetationsbedeckung aufwiesen. Gleichzeitig wurde der Gehalt organischer Substanz an repräsentativen Bodenproben laboranalytisch ermittelt. Durch den Vergleich beider Ergebnisse konnte ein regressionsbasiertes Modell zur Quantifizierung organischer Substanz im Oberboden auf der Basis von Fernerkundungsdaten entwickelt werden (Abb. 6 links). Diese Methode der multitemporalen Bodenmusteranalyse wurde unter Verwendung fester Transformationsparameter für die Bildverarbeitung von einem schlagspezifischen Ansatz zu einem regionalen Ansatz für das gesamte Untersuchungsgebiet erweitert (Blasch *et al.*, 2015). Neben dem Gebiet DEMMIN wurde dieser Ansatz bereits erfolgreich auf ein weiteres Gebiet mit vergleichbarer glazialer Bodengenese (Quillow-Einzugsgebiet bei Prenzlau) übertragen.

Eng an die standortspezifische Bodenvoraussetzung ist die pflanzliche Bruttoprimärproduktion (GPP) gekoppelt, deren raumzeitliche Veränderungsanalyse bei Kulturpflanzen genutzt wird, um globale Kohlenstoffflüsse abzuschätzen, zu verstehen und vorherzusagen. Dies kann dazu beitragen, die Produktion von Lebensmitteln und Biorohstoffen an den Bedarf der wachsenden Weltbevölkerung anzupassen. Für das Untersuchungsgebiet DEMMIN wurde die GPP der Kulturpflanzen anhand von Sentinel-2-Daten vom 12. Juni 2016 geschätzt (Abb. 6). Die Daten ermöglichen Analysen auf Teilschlagebene und können in der Präzisionslandwirtschaft genutzt werden. Die GPP von Kulturpflanzen wird durch die Kombination von Beobachtungen der Photosyntheseleistung (Boden/Pflanze) und der Energieflüsse (SCOPE) berechnet, indem diese Funktionen mit Methoden des maschinellen Lernens analysiert werden. SCOPE ist ein komplexes pro-

zessbasiertes Modell, das den Strahlungstransfer in Blättern und Beständen, Enzymkinetik der Photosynthese und Mikrometeorologie der Oberflächenschicht kombiniert. Zahlreiche Eingabeparameter können aber nur unsicher bestimmt werden bzw. sind gar nicht verfügbar, was die Anwendbarkeit des Modells einschränkt. Anstatt die Eingangsparameter von Blatt, Bestand und Boden (z. B. Chlorophyllgehalt, Blattflächenindex, Blattwinkelverteilung) abzuschätzen, werden verschiedene Modellergebnisse (Reflexionen an Sentinel-2-Bändern und GPP) in einem neuronalen Netzwerk verknüpft. Auf diese Weise können die komplexen Prozesse des Modells berücksichtigt und dabei der Zwischenschritt zum Abrufen mehrerer Variablen ausgelassen werden.

Zunächst wird dazu eine große Anzahl von SCOPE-Simulationen (hier 136 000) durchgeführt, um ein künstliches neuronales Netzwerk (ANN) zu trainieren und die zugrundeliegenden Abhängigkeiten im Netzwerk abzubilden. Danach wird das ANN auf die realen Sentinel-2-Daten für das Gebiet um den Ort Demmin angewendet. Neben Reflexionsdaten der Sentinel-2-Mission werden Informationen über den Sonnenzenitwinkel und meteorologische Daten (aus GLDAS-1: Globales Landdatenassimilationssystem,

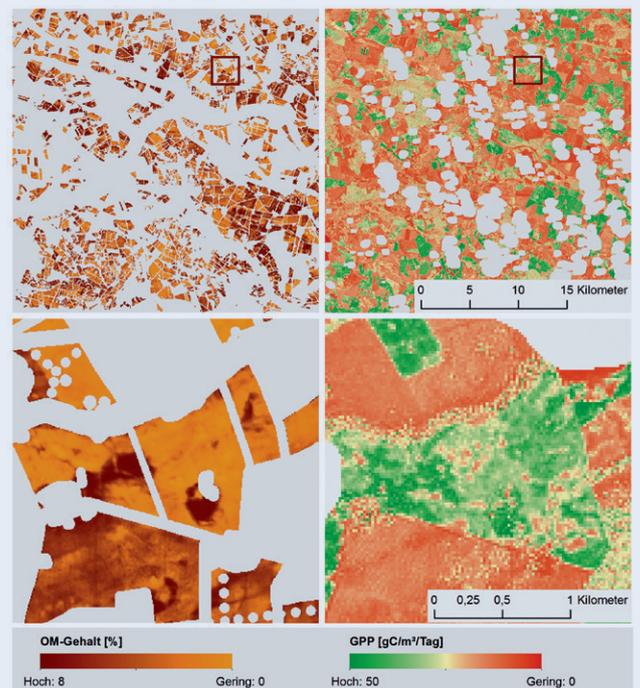


Abb. 6: Zusammenhang der Verteilung von organischer Oberbodensubstanz (OM, links) mit pflanzlicher Bruttoprimärproduktion (GPP, rechts) auf regionaler (oben) und lokaler Skala (unten) für den 12. Juni 2016

Fig. 6: Relationship between spatial distribution of soil organic matter (OM, left) and gross primary productivity (GPP, right) at regional (top) and local scale (bottom) for June 12, 2016

Rodell et al., 2004) genutzt. Das Ergebnis ist eine Karte der täglichen GPP der Kulturen in der Region (Abb. 6 rechts).

Spektral hochauflösende Analyse von mineralischen Ressourcen

In ariden und semiariden Gebieten, die keine bzw. nur eine geringe Vegetationsbedeckung aufweisen, ermöglicht die multispektrale und hyperspektrale Fernerkundung eine Analyse der Boden- und Gesteinsoberfläche im Zusammenhang mit der Exploration von mineralischen Rohstoffen. Hierzu werden die spektralen Eigenschaften (Fingerabdruck) an der Oberfläche vorkommender indikativer Minerale, wie z. B. Hämatit, Goethit und Jarosit analysiert, um oberflächlich oxidierte Zonen von Metallsulfiden (sogenannte Gossans) zu detektieren. Da der spektrale Fingerabdruck der oben genannten Minerale im Wellenlängenbereich von 900 nm spektral breit genug ist, kann dieser sogar mit multispektralen Systemen erfasst werden. Dazu wird die Tiefe des Eisenabsorptionsbands (IFD) als Indikator für die Exploration genutzt (Abb. 7; Mielke et al., 2016). Die auf diese Weise ermittelten Gossans können nun durch gezielte Feldbegehungen weiter erkundet werden. Hierbei ist zu beachten, dass für genauere Analysen der mineralogischen Zusammensetzung der Oberfläche hyperspektrale Satellitendaten, wie sie zukünftig vom EnMAP-System (242 Spektralkanäle) aufgezeichnet werden, notwendig sind.

Die gleichen spektralen Indikatoren können zur Überwachung alter Bergbauhalden verwendet werden (Mielke et al., 2014). Ziel ist dabei, den Materialaustrag in die Umwelt so weit wie möglich zu minimieren. In diesem Zusammenhang kann insbesondere die synergetische Nutzung von multispektralen Satellitensystemen (z. B. Sentinel-2), die eine hohe räumliche und zeitliche Abdeckung aufweisen, in Kombination mit zukünftigen hyperspektralen Systemen (z. B. EnMAP) zeitkritische Informationen (z. B. Moni-

toring von Bergbau- und Bergbaufolgelandschaften, Ölsande) zur Oberflächenzusammensetzung liefern.

Die Zukunft der optischen Satellitenfernerkundung ist hyperspektral

Noch besser als aus den bisher hauptsächlich zur Anwendung kommenden optischen Multispektraldaten lassen sich Materialeigenschaften aus Daten hyperspektraler Aufnahmesysteme bestimmen. Dabei erlaubt die Nutzung des gesamten optischen Wellenlängenspektrums in hoher spektraler Auflösung die detaillierte Abbildung von spektralen Reflexionseigenschaften einschließlich materialspezifischer Absorptions- und Reflexionsbanden. Dieses Messprinzip wird seit Jahren erfolgreich auf der Labor- und Geländeskala sowie auf flugzeuggetragenen Plattformen eingesetzt. Mit der Satellitenmission EnMAP (Abb. 8), an deren Entwicklung das GFZ maßgeblich beteiligt ist, sollen Hyperspektraldaten zukünftig auch von Satelliten aus erhoben werden. Das GFZ stellt den wissenschaftlichen Leiter der EnMAP-Mission (Guanter et al., 2015; Kaufmann et al., 2016) und ist im wissenschaftlichen Vorbereitungsteam verantwortlich für die Entwicklung von Analyseverfahren im Themenfeld von Boden und Geologie. Zusammen mit anderen derzeit in der Entwicklung befindlichen hyperspektralen Satellitenmissionen wird EnMap die Weiterentwicklung von Methoden zur Informationsgewinnung aus Hyperspektraldaten und die weltweite Erschließung neuer Anwendungsfelder ermöglichen.

Besonders relevante Parameter für die Analyse von Böden in ariden und semiariden Gebieten sind die Anteile an Tonen, Karbonaten und anderen Salzen, die mit Multispektralsensoren nicht oder nur sehr ungenau bestimmt werden können. Hyperspektrale Fernerkundung ermöglicht die genaue Quantifizierung von

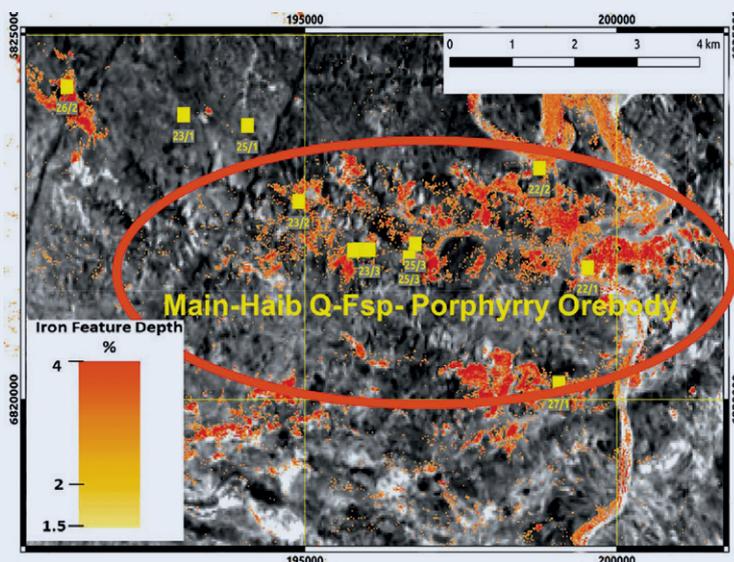


Abb. 7: Analyse der Kupfer-Molybdän-Lagerstätte Haib River im südwestlichen Namibia aus Sentinel-2-Daten, nach Mielke et al. 2016; enthält modifizierte Copernicus-Sentinel-Daten aus 2016

Fig. 7: Analysis of the Haib River Cu-Mo deposits in southwest Namibia using Sentinel-2 Data, based on Mielke et al. 2016, contains modified Copernicus Sentinel Data 2016

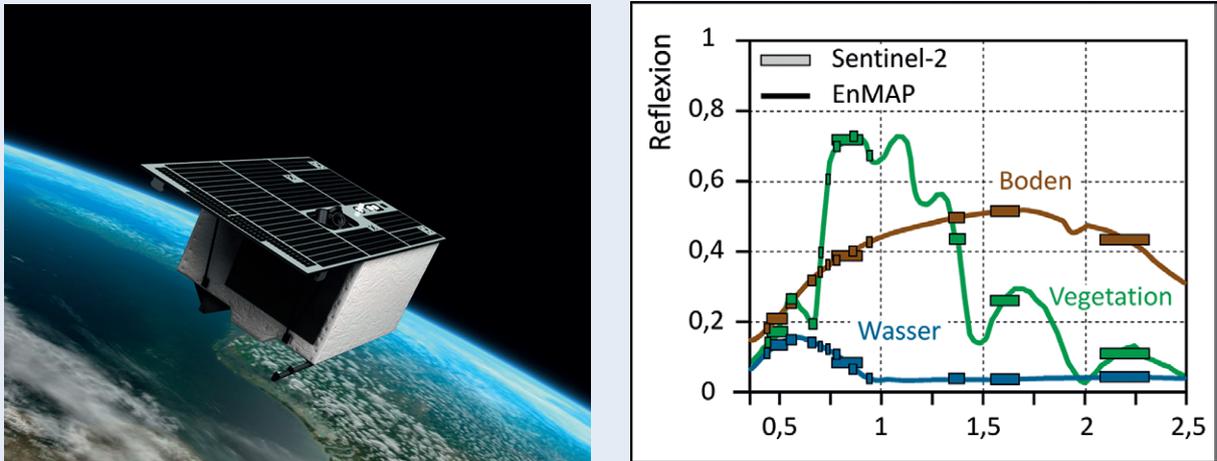


Abb. 8: Der Satellit EnMAP und die Unterschiede in der spektralen Auflösung zwischen EnMAP und Sentinel-2 (Quelle: OHB System AG und DLR)

Fig. 8: The EnMAP satellite and differences in spectral resolution between EnMAP and Sentinel-2

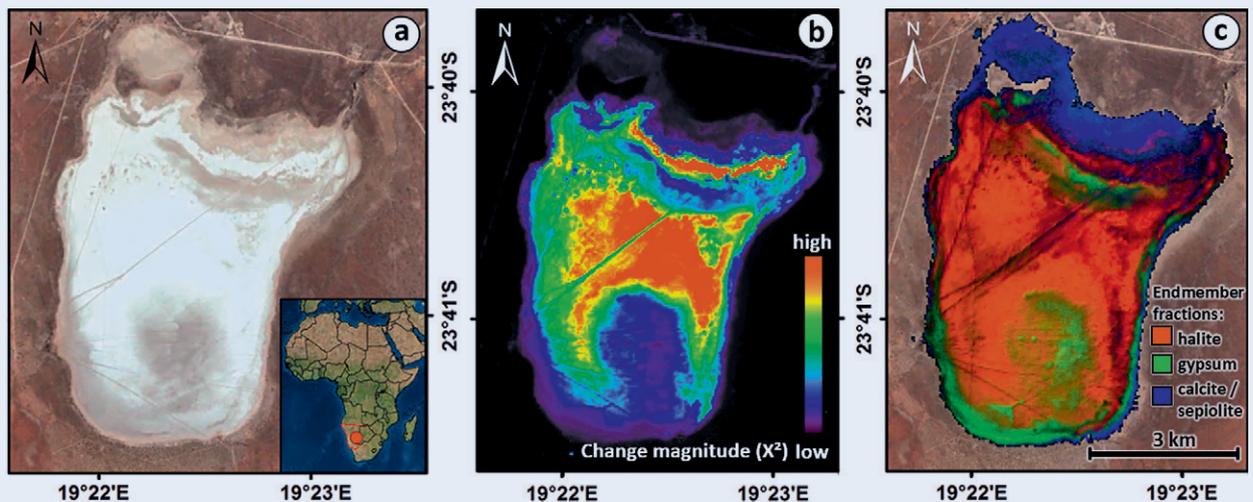


Abb. 9: (a) Omongwa-Salzpflanze, Namibia (Basemap Quelle: DigitalGlobe RGB Bild, September 2013, Google Inc. (Mountain View, CA, USA)); (b) Karte der Veränderungsmagnitude basierend auf dem Landsat-Archiv (1984 bis 2015); (c) mineralogische Kartierung der Salzkrusten basierend auf Hyperion (09/2014)

Fig. 9: (a) Omongwa salt pan, Namibia (Basemap source: DigitalGlobe RGB image, September 2013, Google Inc. (Mountain View, CA, USA)); (b) change magnitude map based on Landsat archive (1984 to 2015); (c) salt crust mineralogical mapping based on Hyperion (09/2014)

Oberflächeneigenschaften von Böden und Sedimenten (Chabrilat et al., 2013) und leistet durch deren Charakterisierung und Kartierung einen wichtigen Beitrag zur Interpretation von Paläoumweltarchiven und deren Oberflächenprozessen.

Im Rahmen des BMBF geförderten SPACES-GeoArchives-Projekts wurden die Dynamik und Mineralogie einer Salzpflanze in der südlichen Kalahari Namibias untersucht (Abb. 9 a, Milewski et

al., 2017). Die höhere spektrale Informationsdichte von hyperspektralen Satellitendaten ermöglicht, die verschiedenen Salze in der Bodenkruste zu identifizieren und deren Konzentration abzuschätzen (Abb. 9 c). Eine parallel hierzu durchgeführte Veränderungsanalyse basierend auf bestehenden multispektralen Satellitenbildarchiven zeigt Zonen unterschiedlicher Dynamik für den Zeitraum der letzten 30 Jahre (Abb. 9 b). Die Ergebnisse legen nahe, dass ein Zusammenhang zwischen der Langzeitdynamik

und der Mineralogie der Oberfläche besteht. Besonders leicht lösliche Salze, wie Halit, die schon bei geringen Niederschlagsmengen oder geringer Bodenfeuchte gelöst werden können, sind sehr dynamisch, während Gips- und Kalkkrusten stabiler sind. Sowohl die chemische Zusammensetzung der Kruste als auch deren mechanische Stabilität bestimmen, wie leicht Winderosion ansetzen kann und haben somit Einfluss auf die Freisetzung von klimawirksamen Staubpartikeln (Aerosole) in die Atmosphäre.

Die aus den hyperspektralen Daten abgeleiteten Informationen über den „Ist-Zustand“ der Mineralogie einer Salzpflanze können wiederum auf die multispektralen Satellitendaten der Sentinel- oder Landsat-Missionen übertragen werden. Durch ihre hohe zeitliche Wiederholrate ermöglichen diese Systeme ein dichtes Monitoring von zukünftigen Veränderungen der Salzkusten. Über das Zusammenspiel mit Hyperspektraldaten kann so Prozessgeschehen nachvollzogen werden und durch die Übertragung auf Zeitreihen werden Verknüpfungen zu Ereignissen von überregionaler Auswirkung wie die Freisetzung von Staubpartikeln und die Auswirkung von Niederschlagsveränderung ermöglicht. Darüber hinaus bietet die Auswertung langjähriger Satellitenbildarchive einen Blick in die jüngere Vergangenheit der Landoberfläche, der als Grundlage für die Interpretation von Paläoumweltarchiven dienen kann.

Tabelle 1 stellt die Vorteile einer synergetischen Nutzung von Daten aus der hyperspektralen Satellitenmission EnMAP in Kombination mit anderen Satellitenmissionen dar. Insbesondere die Kombination der multispektralen Systeme Sentinel-2 und Land-

sat – mit ihrer großen räumlichen Abdeckung und kurzen zeitlichen Wiederholrate – mit EnMAP, der eine hochauflösende spektrale Abtastung im gleichen Spektralbereich wie Sentinel-2 und Landsat vom sichtbaren Licht bis zum kurzwelligigen Infrarot vornimmt, bietet viele Anwendungsmöglichkeiten.

EnMAP ist vor allem als Technologiedemonstrator und wissenschaftliche Mission konzipiert worden. Darüber hinaus sollen auch die wirtschaftlichen Anwendungspotenziale und das Potenzial von Hyperspektralsatelliten für operationelle Dienste im Hinblick auf das Copernicus-Programm untersucht werden. Eine Voraussetzung für viele operationelle Anwendungen, z. B. zur kontinuierlichen Ökosystemüberwachung oder Ableitung von Informationen für landwirtschaftliche Dienste, ist unter anderem eine räumlich und zeitlich hochauflösende Abdeckung der Erdoberfläche.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der schrittweisen Inbetriebnahme der Sentinel-Satelliten von EU und ESA hat eine neue Ära der Satellitenfernerkundung begonnen. Mit den unterschiedlichen Beobachtungseigenschaften der Satelliten können Informationen von regionaler bis globaler Ebene gewonnen werden. Die sich aus der wachsenden Zahl weltraumbasierter Fernerkundungssysteme ergebende erheblich verbesserte Datenverfügbarkeit ermöglicht den Übergang von Zustands- zu Prozessanalysen von natürlich ebenso wie von anthropogen getriebenen Vorgängen im globalen Maßstab. Die Bereitstellung von Fernerkundungsdaten, die anwendungsspezifische Datenselektion und eine automatisierte Vorprozessierung

Tab. 1: Potenzielle Synergien von EnMAP mit anderen Erdbeobachtungsmissionen und Satellitenmessansätzen
 Tab. 1: Potential synergies of EnMAP with other Earth Observation missions and satellite measurement approaches

Erdbeobachtungsmissionen	Synergiepotenzial	Anwendungsbeispiele
Optische Multispektralmissionen zur Landüberwachung wie Sentinel-2 und Landsat 8	Kombination von großer räumlicher Abdeckung und hoher zeitlicher Auflösung mit der hohen spektralen Auflösung von EnMAP zur Verbesserung des Prozessverständnisses	Vegetations- und Landbedeckungskartierung, verbesserte Charakterisierung von Störungsregimen, Artenverteilung, Phänologieanalysen
Optische multispektrale Missionen zur Wasserüberwachung wie Sentinel-3	Kombination von großer räumlicher Abdeckung und hoher zeitlicher Auflösung mit der hohen spektralen Auflösung von EnMAP	Verbesserte Überwachung von Wasserinhaltsstoffen und spezifischen Merkmalen wie Wirbel in Küstengebieten und Binnengewässern
Hyperspektralmissionen wie HypSIRI, Prisma, HISUI und andere	Erhöhung der zeitlichen Auflösung	Vegetationsdynamik, Katastrophenschutz
Radarmissionen wie Sentinel-1 und andere	Kombination der häufigen Radarabdeckung (durch relative Wetterunabhängigkeit) mit der hohen spektralen Auflösung von EnMAP	Charakterisierung von Feuchtgebieten, geologische Kartierung, Fruchtarten (Radar) und Pflanzenzustand (Hyperspektral)

gehören deshalb genauso zum Aufgabenspektrum am GFZ wie die Entwicklung von Auswerteverfahren mit modernen Methoden der digitalen Informationsverarbeitung.

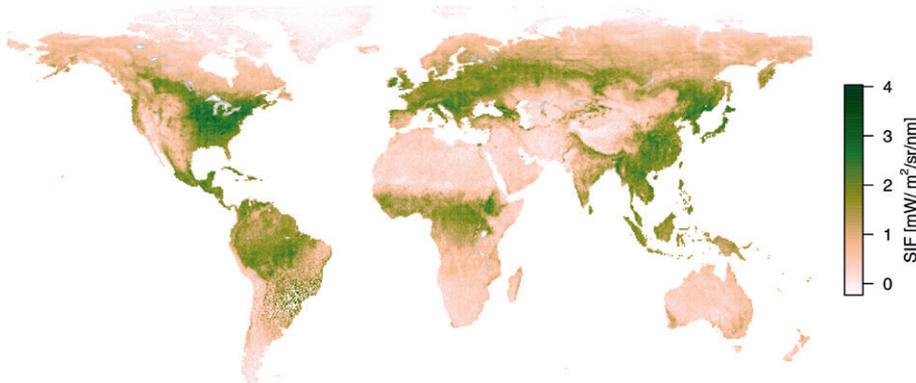
Ein wichtiges zukünftiges fernerkundliches Forschungsfeld ist die synergetische Nutzung von Daten unterschiedlicher Sensorsysteme. So kann z. B. die gemeinsame Auswertung von optischen und Radardaten eine umfassendere Prozesscharakteristik ermöglichen. Dieses Prinzip lässt sich auf das gesamte Wellenlängenspektrum vom sichtbaren Licht über den thermalen Bereich bis hin zum Mikrowellensignal ausdehnen, um auf diese Weise effiziente Analyse- und Monitoringstrategien für Oberflächenparameter in der natürlichen und anthropogenen Umwelt zu entwickeln. Die Verknüpfung der auf diese Weise gewonnenen raumzeitlichen Informationen mit am Boden erhobenen Messdaten im Rahmen von Modellierungen wird neue Nutzungspotenziale erschließen und dazu beitragen, Risiken für unseren Lebensraum besser abzuschätzen zu können und damit helfen, Schäden zu minimieren oder zu vermeiden.

Literatur

- Behling, R., Roessner, S., Golovko, D., Kleinschmit, B. (2016): Derivation of long-term spatiotemporal landslide activity – A multi-sensor time series approach. - *Remote Sensing of Environment*, 186, pp. 88–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.017>
- Behling, R., Roessner, S. (2017): Spatiotemporal Landslide Mapper for Large Areas Using Optical Satellite Time Series Data. - In: Mikos, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K. (Eds.), *Advances in Landslide Science*, (Advancing Culture of Living with Landslides ; 2), Cham : Springer, pp. 143–152. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_17
- Blasch, G., Spengler, D., Itzerott, S., Wessolek, G. (2015): Organic Matter Modeling at the Landscape Scale Based on Multitemporal Soil Pattern Analysis Using RapidEye Data. - *Remote Sensing*, 7, 9, pp. 11125–11150. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70911125>
- Chabrilat, S., Ben-Dor, E., Viscarra Rossel, R. A., Demattê, J. A. M. (2013): Quantitative Soil Spectroscopy. - *Applied and Environmental Soil Science*, 13, 616578. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/616578>
- Guanter, L., Kaufmann, H., Segl, K., Förster, S., Rogaß, C., Chabrilat, S., Küster, T., Hollstein, A., Rossner, G., Chlebek, C., Straif, C., Fischer, S., Schrader, S., Storch, T., Heiden, U., Mueller, A., Bachmann, M., Mühle, H., Müller, R., Habermeyer, M., Ohndorf, A., Hill, J., Buddenbaum, H., Hostert, P., van der Linden, S., Leitão, P. J., Rabe, A., Doerffer, R., Krusemann, H., Xi, H., Mauser, W., Hank, T., Locherer, M., Rast, M., Staenz, K., Sang, B. (2015): The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. - *Remote Sensing*, 7, 7, pp. 8830–8857. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70708830>
- Golovko, D., Roessner, S., Behling, R., Wetzel, H.-U., Kleinschmit, B. (2017): Evaluation of Remote-Sensing-Based Landslide Inventories for Hazard Assessment in Southern Kyrgyzstan. - *Remote Sensing*, 9, 9, 943. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9090943>
- Haghshenas Haghighi, M., Motagh, M. (2017): Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-Scale Interferometry, Atmospheric Effects, and Ground Deformation Mapping. - *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2017, 4, pp. 245–256. DOI: <https://doi.org/10.12902/zfv-0174-2017>
- Kaufmann, H., Sang, B., Storch, T., Segl, K., Förster, S., Guanter, L., Erhard, M., Heider, B., Hofer, S., Honold, H.-P., Penné, B., Bachmann, M., Habermeyer, M., Müller, A., Müller, R., Rast, M., Staenz, K., Straif, C., Chlebek, C. (2016): Environmental Mapping and Analysis Program – A German Hyperspectral Mission. - In: Qian, S.-E. (Ed.), *Optical Payloads for Space Missions*, Chichester : Wiley, pp. 161–182. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118945179.ch7>
- Mielke, C., Rogaß, C., Börsche, N., Segl, K., Altenberger, U. (2016): EnGeoMAP 2.0—Automated Hyperspectral Mineral Identification for the German EnMAP Space Mission. - *Remote Sensing*, 8, 2, 127. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8020127>
- Milewski, R., Chabrilat, S., Behling, R. (2017): Analyses of Recent Sediment Surface Dynamic of a Namibian Kalahari Salt Pan Based on Multitemporal Landsat and Hyperspectral Hyperion Data. - *Remote Sensing*, 9, 2, 170. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020170>
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., Toll, D. (2004): The Global Land Data Assimilation System. - *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 3, pp. 381–394. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Scheffler, D., Hollstein, A., Diedrich, H., Segl, K., Hostert, P. (2017): AROSICS: An Automated and Robust Open-Source Image Co-Registration Software for Multi-Sensor Satellite Data. - *Remote Sensing*, 9, 7, 676. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070676>
- Segl, K., Guanter, L., Rogaß, C., Küster, T., Roessner, S., Kaufmann, H., Sang, B., Mogulsky, V., Hofer, S. (2012): EeteS - The EnMAP End-to-End Simulation Tool. - *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5, 2, pp. 522–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2188994>
- Tóth, G., Jones, A., Montanarella, L. (2013): The LUCAS topsoil database and derived information on the regional variability of cropland topsoil properties in the European Union. - *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 9, pp. 7409–7425. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3109-3>

Netzwerk

Satelliten erfassen Photosynthese mit hoher Auflösung



Solarinduzierte Chlorophyll-Fluoreszenz (SIF) für Juni, Juli und August 2016, erhoben mit dem GOME-2-Instrument an Bord des MetOp-A-Satelliten (Abb.: P. Köhler, Caltech, ehem. GFZ)

Ohne die Photosynthese ist das Leben auf der Erde nicht vorstellbar. Sie liefert Sauerstoff und Nahrung für höhere Lebewesen. Und sie spielt eine maßgebliche Rolle im Klimageschehen, denn über diesen Prozess wird Kohlendioxid (CO_2) aus der Atmosphäre aufgenommen und in Biomasse gebunden. Welche CO_2 -Mengen genau durch die Photosynthese auf der Skala einzelner Ökosysteme bis hin zum globalen Maßstab umgesetzt werden, ist nicht genau bekannt.

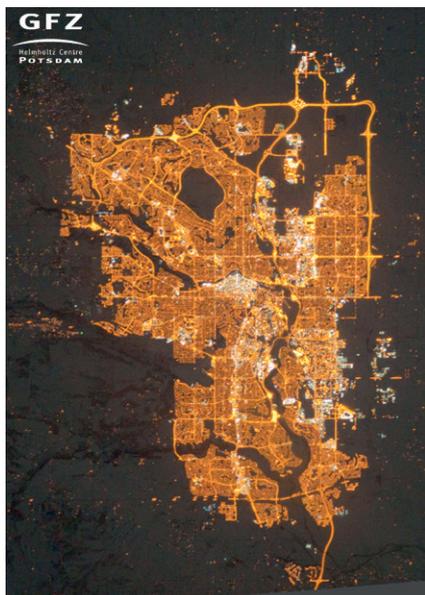
In einer nun im Fachmagazin *Science* erschienenen Studie stellt ein internationales

Autorenteam unter Beteiligung des GFZ einen neuen Ansatz vor, die Photosynthese-Aktivität hochgenau zu erfassen. Die Arbeit nutzt Daten des NASA-Satelliten „OCO-2“ (Orbiting Carbon Observatory 2), um die sogenannte solarinduzierte Chlorophyll-Fluoreszenz, abgekürzt SIF, zu messen – und zwar mit einer wesentlich höheren räumlichen Auflösung als es bislang mit Satelliten möglich war. Das SIF-Signal ist ein natürliches Phänomen von Blättern im Sonnenlicht: Sobald ein Chlorophyll-Molekül durch ein Photon angeregt wird, sendet es – sehr schwach, aber dennoch messbar – eine Fluoreszenzstrahlung

aus, mit Wellenlängen zwischen 660 und 850 nm. Diese SIF-Fluoreszenzstrahlung ist damit ein Anzeiger für die Photosynthese-Aktivität der Pflanzen. Die hoch aufgelösten Messungen tragen dazu bei, den globalen Kohlenstoffkreislauf besser zu verstehen und den Zusammenhang zwischen SIF und der primären Biomasseproduktion weit- aus präziser zu erforschen, als es bisher möglich war. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Sun, Y., Frankenberg, C., Wood, J. D., Schimel, D. S., Jung, M., Guanter, L., Drewry, D. T., Verma, M., Porcar-Castell, A., Griffis, T. J., Gu, L., Magney, T. S., Köhler, P., Evans, B., Yuen, K. (2017): OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence. - *Science*, 358, 6360, DOI: 10.1126/science.aam5747.

Die Umrüstung auf LED-Beleuchtung spart Energie und Geld, führt aber zu steigender Lichtverschmutzung



Die Stadt Calgary in Kanada fotografiert von der Internationalen Raumstation aus (links: 23. Dezember 2010, rechts: 27. November 2015). Die Wohngebiete waren 2010 überwiegend durch gelblich leuchtende Natriumdampflampen erhellt. 2015 sind etliche Bereiche in den Außenbezirken nun ebenfalls dauerhaft beleuchtet. Zudem wurde in vielen Wohngebieten von den gelblich strahlenden Natriumdampflampen auf weiße LED umgestellt. (Abb.: NASA's Earth Observatory/C. Kyba, GFZ)

Kommunen, Unternehmen und Haushalte steigen auf LED-Beleuchtung um, um Energie und Geld zu sparen. Nur könnte die Einsparung verloren gehen, wenn das Geld für zusätzliche oder hellere Lampen ausgegeben wird. Genau diesen „Rebound-Effekt“ fürchten Forschende, die sich mit der künstlichen Beleuchtung des Nachthimmels befassen. Eine internationale Studie unter der Leitung des Wissenschaftlers Dr. Christopher Kyba vom GFZ liefert jetzt Belege für diese Befürchtung: Sowohl die Intensität der künstlichen Aufhellung als auch die Ausdehnung der beleuchteten Fläche haben seit 2012 weltweit um rund 2 % pro Jahr zugenommen. Das berichtet das Team um Kyba, der auch am Berliner Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei forscht, im Fachjournal *Science Advances*.

Die Forschenden nutzten für ihre Arbeit erstmals ein eigens dafür in den Weltraum gebrachtes Strahlungsmessgerät: ein Radiometer, das Licht im sichtbaren und nahe Infrarotbereich erfasst. Das VIIRS (Visible/Infrared Imager Radiometer Suite) kreist seit Oktober 2011 auf dem Satelliten Suomi-NPP um die Erde und detektiert Licht im Wellenlängenbereich zwischen 500 und

900 nm. Die räumliche Auflösung beträgt dabei 750 m, sodass sehr genaue Karten der Lichtabstrahlung über einen Zeitraum von 2012 bis 2016 erzeugt werden konnten. Global betrachtet ist das Maß des Anstiegs der künstlichen Beleuchtung mit dem Wachstum des Bruttosozialprodukts verknüpft, wenngleich es starke regionale Unterschiede gibt. Allerdings ist nur ein Teil der Zunahme sichtbar. Vergleiche der VIIRS-Daten mit Fotografien, die von der Internationalen Raumstation ISS aus aufgenommen wurden, zeigen für manche Städte, dass VIIRS eine Abnahme der Intensität misst, während die Städte tatsächlich genauso hell blieben oder sogar noch heller strahlten. Grund dafür ist der Sensor, der Licht mit Wellenlängen unter 500 nm nicht „sehen“ kann. Moderne weiße LED-Lampen, die das gelbliche Licht aus Natriumdampflampen in vielen Straßenlaternen ersetzen, strahlen weißer, ihr Licht enthält einen höheren Blauanteil mit kurzen Wellenlängen. Kurzum: Für VIIRS erscheinen manche Orte dunkler, selbst wenn sie weißer und heller strahlen. Das betrifft vor allem auch das gestreute Licht, welches für den so genannten Lichtdom (englisch: skyglow) über großen Orten sorgt. Die „Lichtverschmutzung“ ist also

noch stärker, als es die VIIRS-Zeitreihen vermuten lassen.

Gleichwohl gibt es Hoffnung auf Besserung. Andere Studien und Beobachtungen aus Städten wie Tucson in Arizona zeigen, dass man mithilfe moderner LED-Technik die Lichtemission um zwei Drittel senken kann, ohne dass die Menschen dies als dunkler wahrnehmen. Kybas frühere Studien haben überdies ergeben, dass die Lichtemission pro Kopf der Bevölkerung in den USA um den Faktor 3 bis 5 höher ist als die in Deutschland. Für den GFZ-Wissenschaftler ist das ein Beleg dafür, dass man Sicherheit und Wohlstand sowie Sicherheit empfinden auch mit sparsamer Beleuchtung erreichen kann. Der Hauptautor sieht daher ein großes Potenzial in der LED-Revolution, aber nur, wenn das gesparte Geld nicht für noch mehr Lampen ausgegeben wird. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J., Guanter, L. (2017): Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. - *Science Advances*, DOI: 10.1126/sciadv.1701528.

Die Sicherheit von Staudämmen mit Satellitendaten verbessern

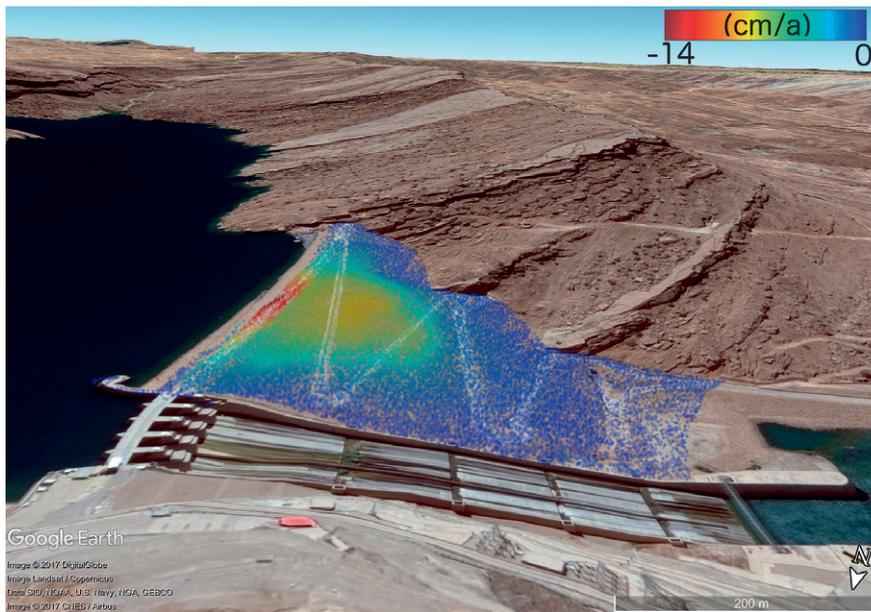
Staudämme werden angelegt, um Wasserressourcen zu speichern, Wasserkraftwerke zu speisen oder Fluten zu kontrollieren. Je nach Volumen der aufgestauten Wassermassen können sie enormen Drücken ausgesetzt sein. Pro Jahrzehnt kommt es weltweit aufgrund dieser Belastung zu etwa zehn ernsthaften Schäden an Staudämmen. Ein internationales Wissenschaftlerteam unter Beteiligung des GFZ hat am Beispiel des Masjed-Soleyman-Staudamms in Iran aufgezeigt, wie die Überwachung von Staudämmen durch Satellitendaten verbessert werden kann. In der Machbarkeitsstudie, veröffentlicht in der Fachzeitschrift *Engineering Structures*, wurden Fernerkundungsdaten des deutschen Erdbeobachtungssatelliten TerraSAR-X ausgewertet. Alle elf Tage überfliegt der Satellit den Masjed-Soleyman-Staudamm

und vermisst mit einer Auflösung von 1 m die Erdoberfläche. Anhand dieser Daten konnten die Wissenschaftler das Deformationsmuster des Staudamms hochgenau und in sehr viel größerer räumlicher Auflösung analysieren, als es mit aktuell verfügbaren bodengestützten geodätischen oder geophysikalischen Instrumenten möglich wäre.

Der 177 m hohe und knapp 500 m breite Masjed-Soleyman-Staudamm wurde zwischen 1995 und 2000 am Fluss Karun im Südwestiran errichtet und besteht wie die meisten Staudämme aus einer Gesteinsschüttung. Er dient vor allem der Energiegewinnung durch Wasserkraft. Mit Fertigstellung des Damms wurde ein bodengestütztes Überwachungssystem installiert, was umso wichtiger wurde, als sich kurz nach der Flutung des Beckens



Risse auf dem Gipfel des Masjed-Soleyman-Staudamms im Südwestiran (Foto: M. Motagh, GFZ)



Stabilitätsanalyse des Staudamms aus dem All (Abb.: Astrium, Google Earth, Digital Globe, Copernicus)

erste Risse auf der Straße am Gipfel des Damms zeigten, die auf Deformationen innerhalb des Damms hindeuteten. Für das Überwachungssystem verteilen sich 25 Zielpunkte über den Staudamm. Deren Bewegung kann von Messpunkten um den Damms herum bestimmt werden, die als stabile Referenzpunkte dienen. Durch das regelmäßige Wiederholen der Messungen lässt sich der vertikale und horizontale Versatz des Gesteins im Zeitverlauf ermitteln. Allerdings sind die Messungen ausschließlich für diese Punkte selber exakt, für die Zwischenräume müssen die Gesteinsbewegungen interpoliert, also berechnet werden.

Ein kontinuierliches Monitoring der Deformationen eines Staudamms ist wichtig, um die Sicherheit flussabwärts zu gewährleisten und um, bei integrierten Wasserkraftwerken, die störungsfreie Energieversorgung zu sichern. Durch die schnelle Entwicklung der Raumfahrttechnik und Datenverarbeitung innerhalb der letzten zwanzig Jahre können heute Mikrowellenfernerkundungstechniken und die Radiointerferometrie (InSAR) als geodätisches Tool eingesetzt werden, um Bewegungen an der Erdoberfläche zu ermitteln. Die mit den modernen Techniken erzeugten Bilder ermöglichen es, Infrastrukturen sehr genau zu kartieren und zu überwachen. Die Wis-

senschaftler zeigen in ihrer Studie, dass die neuen, hochauflösenden Satellitensysteme wie TerraSAR-X es in Zukunft erlauben werden, die zunehmende Instabilität des Staudamms detailliert zu überwachen. Sie gehen davon aus, dass die Ergebnisse auf Staudämme mit gleicher Bauweise übertragbar sind. Die hochauflösenden Satellitensysteme liefern eine neue Art von Radarbildern mit einer Auflösung von bis zu 25 cm, gegenüber den bisher möglichen 10 bis 15 m. Damit revolutionieren sie die Möglichkeiten, Instabilitäten von Infrastrukturen aus dem All zu erfassen. Die Wissenschaftler nehmen an, dass eine Kombination dieser Daten mit den bodengestützten geodätischen Datenerhebungen und Parametern wie dem Wasservolumen, der Konstruktion eines Damms und den geologischen Gegebenheiten des Untergrunds in Zukunft dabei helfen, zuverlässige Modelle zur Stabilitätsanalyse von Infrastrukturen zu entwickeln. ■

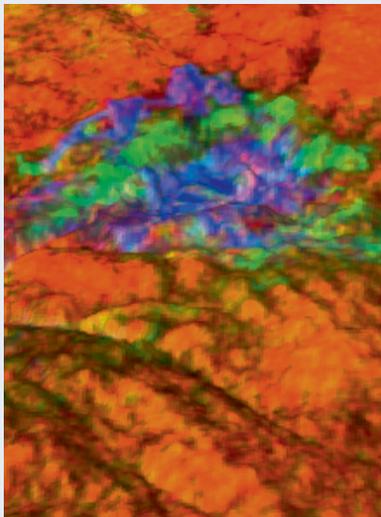
Weitere Untersuchungsergebnisse in: Emadalli, L., Motagh, M., Haghshenas Haghighi, M. (2017): Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, Southwest Iran, using TerraSAR-X SpotLight radar imagery. - *Engineering Structures*, 143, 261-273, DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.04.009.

Rohstofferkundung mithilfe frei zugänglicher Satellitendaten

Die Suche nach mineralischen Rohstoffen ist bisher ein aufwändiges und damit kostenintensives Unterfangen mit großem unternehmerischem Risiko. Ein neues, satellitenbasiertes Verfahren namens ReSens+ (Resource Sensing) kann dazu beitragen, die Effizienz und die Qualität beim Aufsuchen und Erkunden solcher Ressourcen zu steigern. Das Verfahren zeigt räumliche Verteilungen sowie Gehalte von Eisen, Seltenen Erden, Karbonaten und Tonen in mineralischen Rohstofflagerstätten – und zwar in ariden und semiariden Gebieten beliebiger Größe und an jedem (unbedeckten) Ort der Welt. Die Ergebnisse stehen innerhalb weniger Tage zur Verfügung.

Grundlage von ReSens+ ist ein eigens entwickeltes Analysemodell. Es erzeugt aus frei verfügbaren Satellitenbildern hochgenaue Karten, die Informationen zu Elementen und Mineralverteilungen und markanten Abweichungen, so genannten Explorationsanomalien, enthält. Dafür wird die spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichts verglichen mit der Strahlung, die von der Erdoberfläche zurückgeworfen und vom Satelliten gemessen wird. Jedes so normierte, unbekannte Pixelspektrum wird mit den Spektren bekannter Minerale oder Elemente abgeglichen. Da dieser „spektrale Fingerabdruck“ eindeutig ist, kann das Verfahren weltweit eingesetzt werden, um Anreicherungen bestimmter Elemente und Minerale an der Erdoberfläche aufzuspüren.

Die bisher unerreichte Daten- und Ergebnisqualität gründet sich auf mehrere Säulen. Dazu gehören multitemporale Satellitenbeobachtungen, ein zum Patent angemeldetes Verfahren zur Spektralanalyse sowie Querschnittswissen von Geologie und Spektroskopie. Das Verfahren wird außerdem bereits für spektroskopische Analysen aus Drohnen- und Flugzeugbefliegungen eingesetzt.



Das am GFZ entwickelte Verfahren ReSense+ zeigt am Beispiel der Kupfermine El Abra (Chile) auffällige Element- und Mineralverteilungen an der Oberfläche (Abb.: C. Rogass, GFZ)

Die zugrunde liegende Technologie der abbildenden Spektroskopie mit Hilfe multi- und hyperspektraler Satellitensensoren wird am GFZ bereits erfolgreich für land- und forstwirtschaftliche Zwecke routinemäßig genutzt. Aktuelle Forschungsvorhaben sollen die Detektion von Landminen und Munitionsresten ermöglichen, um bisher gesperrte Lebensräume nach einer Beräumung wieder zu erschließen. ■

Kontakt:

Dr. Christian Rogass
GFZ-Sektion Fernerkundung
(christian.rogass@gfz-potsdam.de)

Auf der Suche nach dem verlorenen Stickstoff

Stickstoff ist eines der rätselhaftesten Elemente im System Erde. Egal, wo gemessen wird, ob in der Atmosphäre oder im Festgestein, überall treffen Forschende auf das „Missing Nitrogen“-Problem: Im Vergleich zu anderen Planeten gibt es auf der Erde offenbar viel zu wenig davon. Die Wissenschaftler Felix Kaminsky, Ph.D., KM Diamond Exploration, Kanada, und Dr. Richard Wirth vom GFZ haben nun einen „Zeugen“ aus den Tiefen der Erde aufgespürt, der das Rätsel lösen kann.

Stickstoff ist auf der Erde mit 78 % der Hauptbestandteil der Luft und ein wichtiges Bauelement aller Lebewesen. Ein Vergleich mit anderen Planeten ergibt jedoch, dass auf der Erde noch viel mehr von diesem Element vorkommen müsste. Neuesten Schätzungen zufolge fehlen in der Gleichung bis zu 90 % Stickstoff. Doch wo sind diese Vorkommen? Nach bisherigen Hypothesen könnte ein großer Teil des Stickstoffs während der Entstehung der Erde oder durch einen Meteoriteneinschlag in den Weltraum entgast sein. Nach einer weiteren Hypothese befinden sich große Mengen im Inneren der Erde, im Erdmantel oder Erdkern. Da Messgeräte nicht bis in diese Tiefen vordringen können, war das jedoch bisher nicht mehr als eine Vermutung.

Diamanten aus dem Nordwesten Brasiliens liefern nun den entscheidenden Hinweis. In Rio Soriso durchschlugen tieferreichende vulkanische Schlote, Kimberlit-Schlote genannt, die Erdkruste und beförderten dabei die Diamanten an die Erdoberfläche. Diese Diamanten sind besonders reich an Einschlüssen und stammen aus den untersten Schichten des unteren Erdmantels. Felix Kaminsky und Richard Wirth haben sich die chemische Zusammensetzung von

Materialeinschlüssen in diesen Diamanten genau angesehen und ihre Ergebnisse in der Fachzeitschrift *American Mineralogist* veröffentlicht.

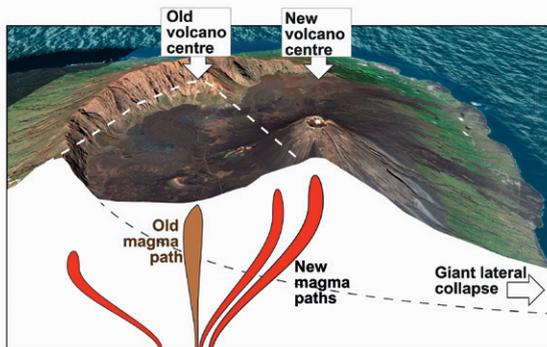
Diamanten werden unter hohem Druck und hoher Temperatur im Erdmantel gebildet und durch vulkanische Aktivität an die Oberfläche befördert. Ihre chemische Zusammensetzung und die des eingeschlossenen Fremdmaterials sind also ein Abbild der Chemie des Erdinneren. Am GFZ hat Wirth die Einschlüsse mittels verschiedener elektronenmikroskopischer Verfahren analysiert und identifiziert. Im Unterschied zu anderen Diamantvorkommen auf der Erde weisen die Einschlüsse in den Rio-Soriso-Diamanten große Mengen an Stickstoff auf. Erstmals konnten hier Eisennitride und Carbonitride, also chemische Verbindungen von Eisen und Kohlenstoff mit Stickstoff, als Einschlüsse nachgewiesen werden. Damit hat die Wissenschaft einen eindeutigen Beleg dafür, dass Stickstoff im unteren Erdmantel und Erdkern vorhanden ist. Die Forscher gehen davon aus, dass Eisen- und Carbonitride typische chemische Verbindungen an der Kern-Mantel-Grenze sind. Flüssiges Metall transportiert vermutlich die Verbindungen aus dem Erdkern in die untersten Schichten des unteren Mantels. Der „verlorene“ Stickstoff im Erdsystem scheint gefunden. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Kaminsky, F., Wirth, R. (2017): Nitrides and carbonitrides from the lowermost mantle and their importance in the search for Earth's "lost" nitrogen. - *American Mineralogist*, 102, 1667-1676, DOI: 10.2138/am-2017-6101.



Diamanten geben einen Einblick in die Chemie des tiefen Erdinneren. (Mikroskopaufnahme: A. Schreiber, GFZ)

Magma sucht sich nach Flankenkollaps neue Wege



Am Vulkan Fogo auf den Kapverden hat sich nach einem Flankenkollaps ein neues Vulkanzentrum gebildet. (Abb.: T. Walter, GFZ)

Bei Vulkanausbrüchen kommt es immer wieder zu gigantischen Hangrutschungen an den Vulkanflanken mit katastrophalen Folgen, von Vulkanexplosionen bis zu Tsunami. Eine in *Nature Communications* veröffentlichte Studie von GFZ-Forscherinnen und -Forschern zeigt, dass solche lateralen Kollapse nicht nur die Chemie des Magmas beeinflussen, sondern auch dessen Aufstiegswege. So können sich neue Vulkanzentren an anderen Orten bilden,

nachdem so eine massive Hangrutschung das Spannungsfeld im Untergrund verändert hat.

Die Gruppe nutzte für ihre Arbeit ein mathematisches Modell, mit dem sie die Magmaausbreitung unter einer Vulkankuppe simulierten. Dabei zeigte sich, dass die mechanischen Effekte einer Hangrutschung auf die Erdkruste die Magmaflüsse ablenken und zur Formung eines neuen Vulkan-

zentrums führen können. Das Team verglich die Modellergebnisse mit Beobachtungen vom Vulkan Fogo auf den Kapverden und fand eine große Übereinstimmung.

Auch in anderen Regionen ist so eine Vulkanverlagerung nach einem Flankenkollaps nicht ungewöhnlich. Sie ist z. B. auf den kanarischen Inseln, auf Hawaii, am Stromboli und an anderen Vulkanen zu beobachten. Die Studie dürfte insbesondere zum besseren Verständnis von so genannten Intraplattenvulkanen beitragen und die Prozesse erhellen, die beim Wachstum und Kollaps von Vulkanen miteinander wechselwirken. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Maccaferri, F., Richter, N., Walter, T. (2017): The effect of giant lateral collapses on magma pathways and the location of volcanism. - *Nature Communications*, DOI: 10.1038/s41467-017-01256-2.

Inbetriebnahme des Geothermischen Niedertemperatur-Demonstrationskraftwerks in Lahendong, Indonesien



Geothermisches Niedertemperatur-Demonstrationskraftwerk in Lahendong, Indonesien (Foto: GFZ)

Im September 2017 wurde auf dem Geothermiefeld in Lahendong in der Nähe von Pangolombian, Nordsulawesi, das erste geothermische Niedertemperatur-Demonstrationskraftwerk in Indonesien erfolgreich in Betrieb genommen. Es befindet sich nun im Testbetrieb. Das Konzept des Demonstrationskraftwerks wurde seit 2013 vom GFZ unter Mitwirkung der indonesischen Projektpartner BPPT (Agency for the Assessment and Application of Technology) und PGE (Per-

tamina Geothermal Energy) entwickelt und vom BMBF gefördert. Ziel der Zusammenarbeit ist es, verlässliche und effiziente Niedertemperatur-Stromerzeugung an einem geothermischen Standort in Indonesien zu demonstrieren und so die Basis für eine breite Anwendung in diesem Land zu legen. Das Demonstrationskraftwerk soll einen Teil des bislang ungenutzten Thermalwassers von 170 °C auf 140 °C abkühlen und so Strom erzeugen. Während der Testphase beträgt die Temperatur des Wärmeträgers 145 °C, womit rund 300 kW Leistung erreicht werden. Im Normalbetrieb soll eine Leistung von bis zu 500 kW produziert werden. Bezogen auf den Durchschnittsverbrauch in Deutschland ist diese Leistung ausreichend, um rund 1200 Haushalte mit Strom zu versorgen.

Das geothermische Demonstrationskraftwerk basiert auf einem Organic Rankine Cycle (ORC). Dies ist ein besonderes Verfahren, bei dem nicht Wasser, sondern eine organische Flüssigkeit zum Antrieb

einer Dampfturbine genutzt wird. Der ORC ist über geschlossene Wasserzwischenkreise (einen Heißwasser- und einen Kaltwasserzwischenkreis) an die geothermische Wärmequelle bzw. die Umgebung als Wärmesenke angebunden. Die Erfahrungen der Entwicklungs- und Betriebsphase des Demonstrationskraftwerks werden die Umsetzung der Niedertemperatur-Kraftwerkstechnik für Indonesien maßgeblich vorantreiben. Die Technik ermöglicht es, die Nutzung bestehender geothermischer Standorte zu erweitern und vor allem auch eine Option für die dezentrale Energieversorgung in Indonesien zur Verfügung zu stellen.

Der Forschungs- und Demonstrationsbetrieb des Niedertemperatur-Kraftwerks soll bis Mitte 2018 unter Federführung des GFZ fortgeführt werden. Im Anschluss soll das Demonstrationskraftwerk an eine indonesische Partnerorganisation übergeben werden. ■

Erstes Erdbebenmonitoring-Netzwerk in Zentralasien installiert



Omnidirektionale Kameraaufnahme des Gebäudebestands in Osh, Kirgisistan (Foto: ZAIAG/GFZ)

Wenn in einer seismisch aktiven Region Städte wachsen und Bevölkerungszahlen steigen, erhöht sich das von einem Erdbeben ausgehende Gefährdungspotenzial: Der zu erwartende Schaden an der Infrastruktur wird größer und der Verlust von Menschenleben wahrscheinlicher. Insbesondere Entwicklungsländer sind verletzlich, da hier Aspekte wie ein nicht erdbebensicheres Bauen hinzukommen, die das Gefährdungspotenzial weiter erhöhen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ haben zusammen mit dem Zentralasiatischen Institut für Angewandte Geowissenschaften (ZAIAG) in einer Fallstudie das erste seismische Netzwerk zur Erdbebenüberwachung und Frühwarnung in Kirgisistan und Kasachstan installiert. Zentralasien ist weltweit eine der Regionen mit der größten seismischen Aktivität. Die Indische Platte schiebt sich mit einer Geschwindigkeit von vier bis fünf Zentimetern pro Jahr in Richtung Norden gegen die Eurasische Platte. Entlang dieser Kollisionszone kommt es immer wieder zu Erdbeben. Bisher gibt es in der Region nur vereinzelte seismische Stationen, ein umfangreiches Monitoringnetzwerk zur Aufzeichnung von Erdbeben fehlt. Auch gibt es keine Stationen zur Registrierung starker Bodenbewegungen. So konnten Beben bisher weder detailliert überwacht noch Warnsysteme für die Bevölkerung installiert werden. Außerdem fehlen umfangreiche lokale Datensätze zur Erforschung der Erdbebenaktivität und Gefährdungslage. Im Rahmen der Initiative ACROSS „Advanced Remote Sensing – Ground Truth Demo

and Test Facilities“ und in Zusammenarbeit mit dem Zentralasiatischen Global Change Observatory des GFZ, haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in Kirgisistan und Kasachstan das erste digitale seismische Echtzeitnetzwerk für Zentralasien installiert. Ziel war der Entwurf eines Netzwerkdesigns unter Einsatz minimaler Ressourcen, das auch für andere Regionen angewendet werden kann. Die Ergebnisse sind in der Fachzeitschrift *Frontiers in Earth Science* veröffentlicht. Bei der Positionierung der Messstationen wurde darauf geachtet, dass sie permanent sicher installiert sind und eine Infrastruktur zur Stromversorgung und digitalen Datenübertragung in Echtzeit bereitsteht. Ohne die Echtzeitübertragung könnte das seismische Netzwerk nicht für den Betrieb eines Frühwarnsystems eingesetzt werden, da das Warnsystem auf die seismischen Daten angewiesen ist.

In Zusammenarbeit mit dem kirgisischen Ministerium für Notfallsituationen wurden 19 Standorte für Starkbewegungsstationen eingerichtet, die möglichst nah an den optimal ermittelten Positionen liegen. In der kirgisischen Hauptstadt Bischkek wurden außerdem kostengünstige Gebäude- und Tiefensensoren in das Netzwerk integriert. Die enge Zusammenarbeit mit den Endnutzern des Systems vor Ort ist ein wichtiger Faktor für die erfolgreiche Installation und den späteren Betrieb des Netzwerks.

Die seismischen Aktivitäten des Untergrunds werden mit der am GFZ entwickelten

Software GFZ-Sentry ausgewertet. Aus den eingehenden Daten bestimmt die Software kritische Bewegungen und informiert einen Netzwerkoperateur, falls die Daten auf ein Erdbeben mit hohem Gefährdungspotenzial hindeuten. Der Operateur entscheidet, ob eine Bebenwarnung ausgegeben wird, auf die dann die jeweiligen Behörden vor Ort reagieren können.

Das System befindet sich derzeit in der Testphase, doch schon jetzt konnte das Team zeigen, dass ein Netzwerk aus vergleichsweise wenigen seismischen Stationen einen großen Nutzen für die Frühwarnung hat. Das System soll nun zur Verbesserung und zu Forschungszwecken weiter begleitet werden. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Parolai, S., Boxberger, T., Pilz, M., Fleming, K., Haas, M., Pittore, M., Petrovic, B., Moldobekov, B., Zubovich, A., Lauterjung, J. (2017): Assessing earthquake early warning using sparse networks in developing countries: Case study of the Kyrgyz Republic. - *Frontiers in Earth Science*, 5, DOI: 10.3389/feart.2017.00074.

Wenn Kontinente zerbrechen wird es warm auf der Erde



Unsere Kontinente sind durch das Zerbrechen des Superkontinents Pangäa entstanden. In dieser Plattenrekonstruktion vor 180 Mio. Jahren sind zur Orientierung die heutigen Staaten dargestellt. An den Bruchstellen trat vermehrt Kohlenstoff aus der Tiefe aus und beeinflusste damit die Klimaentwicklung. (Abb.: S. Brune, G. Plates, CC-BY-ND)

Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre entscheidet darüber, ob sich die Erde in einem Treibhaus- oder einem Eishaus-Zustand befindet. Bevor der Mensch begann, die CO₂-Konzentration der Lufthülle zu beeinflussen, wurde diese allein durch ein Wechselspiel von geologischen und biologischen Prozessen bestimmt, dem globalen Kohlenstoffkreislauf. Eine aktuelle Studie unter Führung des GFZ zeigt, dass das Auseinanderbrechen von Kontinenten – von Fachleuten als Rifting bezeichnet – maßgeblich zu einem erhöhten Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre beitrug.

Die Kohlenstoffverteilung der Erde ist sehr ungleichmäßig: Nur ein Hunderttausendstel des Kohlenstoffs unseres Planeten befindet sich in Atmosphäre, Biosphäre und den Ozeanen, die übrigen 99,999 % sind in der tiefen Erde gebunden. Dieser enorme Kohlenstoffspeicher ist aber nicht von der Atmosphäre isoliert, sondern es gibt einen anhaltenden Austausch über Jahrmillionen hinweg: Erdplatten, die in den tiefen Erdmantel absinken, nehmen große Mengen an Kohlenstoff mit sich. Gleichzeitig, so glaubte man, gelangt Kohlenstoff hauptsächlich durch Vulkanismus an mittelozeanischen Rücken wieder an die Oberfläche, in Form von CO₂.

In der Studie, die im Fachjournal *Nature Geoscience* erschien, kommt das Forscherteam zu einem anderen Schluss. Zwar führt auch der Vulkanismus am Boden der Ozeane zur Entgasung von Kohlendioxid, der maßgebliche CO₂-Eintrag in die Atmosphäre geschieht jedoch an Grabensystemen auf Kontinenten wie etwa dem Ostafrikanischen Rift oder dem Eger-Rift in Tschechien. Grabensysteme entstehen, wenn Kontinente gedehnt werden, was schließlich zum Aus-

einanderbrechen von ganzen Erdplatten führen kann. Das Rift in Ostafrika ist mit einer Länge von etwa 6000 km zwar das größte Grabensystem weltweit, allerdings erscheint es klein im Vergleich mit den Riftsystemen, die vor 130 Mio. Jahren zum Zerbrechen des Superkontinents Pangea geführt haben und ein Netzwerk von über 40 000 km Länge bildeten.

Mithilfe von plattentektonischen Modellen der vergangenen 200 Mio. Jahre und anderen geologischen Indizien haben die Wissenschaftler die Entwicklung des globalen Riftnetzwerks rekonstruiert. Dabei konnten sie die Existenz zweier großer Riftperioden nachweisen: vor rund 130 und 50 Mio. Jahren. Mittels numerischer Modelle des globalen Kohlenstoffkreislaufs haben die Forscher den Einfluss erhöhter CO₂-Entgasungen in Rifts simuliert und zeigten, dass beide Riftperioden mit einer erhöhten CO₂-Konzentration der damaligen Atmosphäre korrelieren.

Die weltweiten CO₂-Entgasungsraten von Rifts entsprechen allerdings nur einem Bruchteil der derzeitigen anthropogenen CO₂-Freisetzung. Dennoch stellen sie eine bisher fehlende Schlüsselkomponente des tiefen Kohlenstoffkreislaufs dar, der den langfristigen Klimawandel über Jahrmillionen hinweg steuert. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Brune, S., Williams, S. E., Müller, R. D. (2017): Potential links between continental rifting, CO₂ degassing and climate change through time. - *Nature Geoscience*, DOI 10.1038/s41561-017-0003-6.

Abschlusskonferenz für Kohlenstoffdioxid-Speicherung im Untergrund

Nach 13 Jahren erfolgreicher Forschungsarbeit geht das Projekt Ketzin jetzt zu Ende. In der Stadt an der Havel hat das GFZ erforscht, ob sich Kohlenstoffdioxid (CO₂) sicher und dauerhaft im Untergrund speichern lässt und wie es sich in der Tiefe verhält. Dazu wurden mehr als 67 000 Tonnen CO₂ zwischen 2008 und 2013 über eine Bohrung in einen so genannten Speicherhorizont gepumpt. Dort, in rund 630 m Tiefe, befindet sich poröser Sandstein, der von salzhaltigem Grundwasser durchzogen ist – ein „saliner Aquifer“. Vier weitere Bohrungen wurden abgeteuft, um die Ausbreitung des CO₂ im Untergrund sowie die Dichtigkeit des Speichers mit modernsten geochemischen und geophysikalischen Methoden zu überwachen.

Bei einer Abschlusskonferenz am 13. September 2017 zogen die beteiligten Forscherinnen und Forscher Bilanz und diskutierten mit europäischen Fachleuten die Perspektiven der CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS für Englisch: Carbon Capture and Storage). Das Projekt hat gezeigt, dass sich Kohlenstoffdioxid sicher in die Tiefe bringen und speichern lässt. Die mächtigen Schichten aus Tongestein über dem Speicherhorizont bilden eine zuverlässige Abdichtung.

Die Forschungsarbeiten in Ketzin begannen mit Vorerkundungen im Jahr 2004. Von Anfang an wurden die Kommune und die lokale Bevölkerung in das Forschungsvorhaben mit einbezogen. Bis heute genießt das Projekt hohe Akzeptanz. Nach dem Ende der CO₂-Injektion wurde die Speicherüberwachung weitere viereinhalb Jahre fortgesetzt, um die Stabilität des Speichers zu beobachten. Die Überwachung zeigte keine Unregelmäßigkeiten des Speichers und wurde Ende 2017 abgeschlossen. Die Bohrlöcher werden verfüllt und die Bodenoberfläche in den vorherigen Zustand versetzt. ■

Weitere Informationen:

<http://www.co2ketzin.de/dialog-amp-kontakt/fragen-und-antworten/>

Mikroben in der Wüste – ein neues Archiv für die Klimaforschung



Probennahme in der Kalahari
(Foto: S. Genderjahn, GFZ)

Unter einem extremen Klima schaffen es nur wenige Zeugen von Umweltbedingungen der Vergangenheit bis heute zu überdauern. Pollen zum Beispiel, die auf die Zusammensetzung der Vegetation früherer Zeiten hinweisen können, bleiben in Klimaarchiven wie Seesedimenten nur unter ganz bestimmten Bedingungen erhalten. In extrem trockenen Regionen wie der Kalahari im südlichen Afrika sind Archive mit Pollen oder anderen Klimazeugen besonders rar. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ haben sich in Südafrika zusammen mit einem Kollegen der Universität Oldenburg auf die Suche nach bisher nicht erschlossenen Klimaarchiven gemacht.

Die Klimaforschung untersuchte die Klimaentwicklung der Vergangenheit dieser Region bisher vor allem anhand von kalkhaltigen Ablagerungen wie Tuffsteinen, Stromatolithen und Tropfsteinen. Diese Klimaarchive sind jedoch selten und die Klimarekonstruktion für die Kalahari ist deshalb sehr lückenhaft.

Ein häufiges Landschaftselement in Südafrika sind Verdunstungsbecken, sogenannte Pfannen. Winderosion formt diese Senken während Trockenperioden. In feuchteren Phasen sammelt sich durch ablaufendes Oberflächenwasser Sediment an. Weiteres Sediment wird durch Winde hineintransportiert. In einer neuen Studie, veröffentlicht im Fachjournal *Organic Geochemistry*, untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die mikrobielle Aktivität in einem Verdunstungsbecken.

Wasser ist eine Grundvoraussetzung für mikrobielles Leben. Spuren von Mikroorganismen lassen darauf schließen, dass zu deren Lebzeiten Wasser verfügbar gewesen sein muss. Das Autorenteam um Steffi Genderjahn hat deshalb die Hypothese aufgestellt, dass aus der Menge und Zusammensetzung mikrobieller Lebensgemeinschaften in Verdunstungsbecken die klimatischen Bedingungen der Vergangenheit abgeleitet werden können.

Da die Mikroben der Vergangenheit längst nicht mehr leben, untersuchten sie sogenannte Biomarker. Das sind molekulare Reste von Lipiden, in diesem Fall aus den Membranen von Mikroorganismen, die auch heute noch anzeigen, von welchen Mikroorganismen sie einst gebildet wurden. In der Witpan, einem Verdunstungsbecken in der südlichen Kalahari, hat das Team die Sedimentabfolge der oberen 1,20 m beprobt. Zusammen mit Untersuchungen von Veränderungen der Sedimenteigenschaften, wie dem Anteil von Kohlenstoff organischen Ursprungs, dienen die enthaltenen mikrobiellen Biomarker als Schlüssel zur Vergangenheit.

In den Proben fanden sich Biomarker von Mikroorganismen, die auf salzhaltige und nährstoffarme Bedingungen hinweisen. Außerdem konnten starke Veränderungen in der Menge der Mikroorganismen und Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft im Zeitverlauf – je weiter unten im Sediment, desto weiter in der Zeit zurück – festgestellt werden. Die erbohrten Se-

dimente umfassen eine Zeitspanne vom letzten glazialen Maximum (LGM) vor etwa 20 000 Jahren bis ins heutige Holozän. Die molekularen Klimazeugen aus den Beckensedimenten deuten darauf hin, dass es während des LGM vergleichsweise feucht in der Kalahari war. Während der darauffolgenden Warmphase finden sich hingegen nur noch wenige Spuren mikrobiellen Lebens, und die Signale, die sich finden, weisen auf Trockenheit, wenig Nährstoffe und kaum Vegetation hin. In den obersten Schichten zeigen sich wiederum deutliche Spuren von Leben. In der jüngeren Vergangenheit muss Wasser also immer wieder mal, wahrscheinlich durch saisonalen Regen, verfügbar gewesen sein. Das Autorenteam hat die Methode auch auf ein weiter nordwestlich gelegenes Becken angewandt und dort um DNA-basierte Untersuchungen ergänzt. Die Ergebnisse stehen ebenfalls kurz vor der Veröffentlichung und scheinen die aktuelle Studie zu bestätigen. Tatsächlich steht also der Klimaforschung mit den Verdunstungsbecken in trockenen Gebieten wie der Kalahari, die ansonsten arm an regionalen Klimadaten sind, ein neues Archiv zur Verfügung. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Genderjahn, S., Alawi, M., Kallmeyer, J., Belz, L., Wagner, D., Mangelsdorf, K. (2017): Present and past microbial life in continental pan sediments and its response to climate variability in the southern Kalahari. - *Organic Geochemistry*, 108, pp 30-42, DOI: 10.1016/j.orggeochem.2017.04.001.

Jahrtausende alter Staub aus der Sahara verrät Neues zur Entstehungsgeschichte der Wüste



Der Sidi Ali-See im Mittleren Atlas Marokkos am Nordrand der Sahara (Foto: Institut für Geographie, Universität Leipzig)

Die Sahara ist die größte Trockenwüste der Welt und damit auch die größte Staubquelle der Erde. Ihre Stäube düngen die Weltmeere und beeinflussen die Klimaentwicklung und Landökosysteme. Ein internationales Team unter der Leitung der Universität Leipzig und mit Beteiligung des GFZ hat nun die Geschichte der Entstehung der Sahara anhand von Staubablagerungen in einem marokkanischen See rekonstruiert.

Der Sidi Ali-See im Mittleren Atlas Marokkos liegt auf einer Höhe von 2080 m über dem Meeresspiegel am Nordrand der Sahara. Anhand von Staubablagerungen in diesem

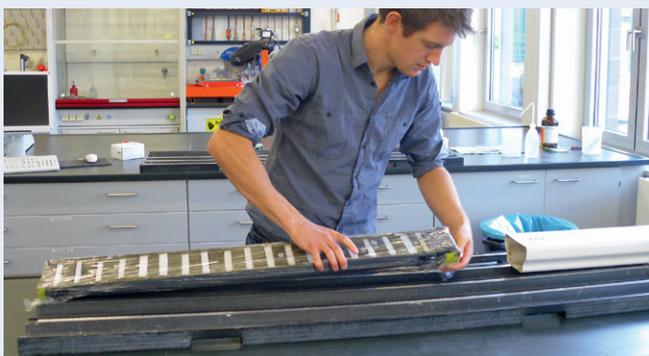
See haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das Auftreten von Staubstürmen bis in eine Zeit vor 12 000 Jahren zurückverfolgt. Ihre Ergebnisse haben sie nun in der Fachzeitschrift *Quaternary Science Reviews* veröffentlicht.

Schon lange ist bekannt, dass das Gebiet der heutigen Sahara nicht immer eine Wüste war. Es gab Zeiten, in denen hier das Leben blühte und in großräumigen Savannen- und Steppenlandschaften Löwen und Elefanten umherstreiften und Menschen lebten. Bisherige Studien gehen von einem Ende der grünen Sahara zwischen 7000 und 3000 Jahren vor heute aus. Unter welchen Umständen die Sahara dann zur heutigen Wüste wurde, wird jedoch noch diskutiert. Die GFZ-Forscherin Dr. Elisabeth Dietze hat anhand der Korngrößenverteilung des Sedimentstaubs ermittelt, dass dieser durch Windtransport, also durch Staubstürme aus der Sahara in den See eingetragen worden sein muss. Das Auftreten von Saharastaub in den Sedimenten kann daher ein Indiz dafür sein, wann Regionen der Sahara zur Wüste wurden, da eine geringe Pflanzenbedeckung Staub entstehen lässt.

Das Team trägt damit neue Erkenntnisse zu einer größeren Debatte bei: Offenbar wurde die Sahara nicht, wie lange diskutiert, nur allmählich und graduell zur Wüste und es gab auch kein einmaliges abruptes Ereignis, das die grüne Sahara austrocknete. Mehrere Phasen mit Staubablagerungen im See deuten vielmehr darauf hin, dass der Wandel stufenweise ablief. Staubphasen finden sich schon während des Maximums der Feuchtperiode und leiteten zwischen 6600 und 6000 Jahren vor heute in die Trockenperiode über. Endgültig zur heutigen Wüste wurde die Sahara dann vor etwa 4700 Jahren. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Zielhofer, C., von Suchodoletz, H., Fletcher, W.J., Schneider, B., Dietze, E., Schlegel, M., Schepanski, K., Weninger, B., Mischke, S., Mikdad, A. (2017): Millennial-scale fluctuations in Saharan dust supply across the decline of the African Humid Period. - *Quaternary Science Reviews*, 171, 119-135, DOI: 10.1016/j.quascirev.2017.07.010.

Abkühlung im hohen Norden führte zu Wüstenbildung in Nordafrika



James Collins bei der Entnahme von Proben aus einem Sedimentkern (Foto: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen)

Auf den ersten Blick verwirren die Felszeichnungen: In einer Höhle der ägyptischen Sahara, einem der trockensten Orte der Erde, zeigen sie schwimmende Menschen. Die steinzeitlichen Kunstwerke sind Schätzungen zufolge bis zu 10 000 Jahre alt. Sie entstanden während einer niederschlagsreichen Zeit, der sogenann-

ten Grünen Sahara, die vor 11 500 bis 5500 Jahren herrschte. Klimaforscherinnen und -forscher rätseln bis heute, welche Ursachen die folgende Wüstenbildung hatte und warum die Austrocknung so rasch erfolgte. Nun hat ein Forschungsteam aus verschiedenen europäischen Einrichtungen herausgefunden, dass offenbar

eine Abkühlung des Klimas in hohen nördlichen Breiten dazu führte, dass die niederschlagsreiche Phase in der heutigen Sahara so schnell zu Ende ging. Sie berichten davon im Fachmagazin *Nature Communications*.

Der Studie zufolge führte ein Temperatursturz in der Arktis und den mittleren Breiten der Nordhemisphäre dazu, dass starke Höhenwinde über Afrika – der tropische Oststrahlstrom – geschwächt wurden. Infolgedessen gingen die Niederschläge über Afrika zurück. Im Zusammenspiel mit weiteren komplexen Rückkopplungen im Klimasystem kippte die feuchte Phase hin zu einer trockenen Periode, die zur Wüstenbildung führte, erläutert der Hauptautor der Studie, James Collins (GFZ/AWI).

Die Forscherinnen und Forscher analysierten Blattwachs, das in Sedimenten im Golf von Guinea gefunden wurde. Die Wachslipide enthalten langkettige Kohlenwasserstoffe, die von Pflanzen produziert werden, um ihre Blätter zu schützen. Das Verhältnis der Wasserstoffisotope in diesen Molekülen kann heute als Indikator für die Niederschlagsintensität zu Lebzeiten der Pflanze dienen. Anhand dieser Isotopenverhältnisse im Blattwachs und mittels Computermodellen des Klimas konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Regenmenge im

heutigen Kamerun und dem zentralen Teil der Sahara-Sahelzone über die letzten Jahrtausende rekonstruieren. Dabei zeigte sich, dass es vor rund 5500 Jahren einen raschen Wechsel hin zu sehr trockenem Klima gab.

Obwohl die Abkühlung in den höheren Breiten vermutlich nicht der einzige Treiber des Klimawechsels in Afrika war, so scheint sie doch das entscheidende fehlende Puzzlestück zu sein, um den abrupten Wandel zu erklären. Ausgehend von den Befunden erscheint es möglich, dass die gegenwärtige Erwärmung der Arktis und der Rückgang des Meereises einen starken Einfluss auf

die Niederschlagsverhältnisse in den Tropen haben. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Collins, J. A., Prange, M., Caley, T., Gimeno, L., Beckmann, B., Mulitza, S., Skonieczny, C., Roche, D., Schefuß, E. (2017): Rapid termination of the African Humid Period triggered by northern high-latitude cooling. - *Nature Communications*, DOI: 10.1038/s41467-017-01454-y.

Im überfluteten Permafrostboden erwachen Mikroben langsam aus dem „Eiszeitschlaf“



Probennahme in der Arktis (Foto: A. Kitte, GFZ)

Der Untergrund weiter Flächen arktischer Flachwasserzonen besteht aus Permafrost. Bisher ist nur wenig darüber bekannt, wie die Mikroorganismen in diesen Böden unterhalb des Meeresspiegels auf eine zunehmende Erwärmung reagieren. GFZ-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler der Helmholtz-Nachwuchsgruppe MicroCene, unter der Leitung von Prof. Susanne Liebner, haben nun mikrobielle Gemeinschaften in zwei Bohrkernen aus dem sibirischen submarinen Permafrost untersucht. Sie zeigen, dass die Mikroben auf die Erwärmung mit einer erhöhten Aktivität reagieren, wenn auch mit großer zeitlicher Verzögerung.

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Laptevsee im Osten Sibiriens, wo mehr als 80 % des weltweiten submarinen Permafrosts vermutet werden. Dort hat das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) mit russischen Partnern des Melnikov-Permafrostinstituts Yakutsk Bohrkern aus dem Permafrost gezogen, anhand derer das GFZ-Team nun die Mikroben im Permafrost

untersucht. Ursprünglich gebildet wurde der Permafrostboden an Land. Der seit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 15 000 Jahren steigende Meeresspiegel hat jedoch dazu geführt, dass der gefrorene Boden heute unterhalb der Meeresoberfläche liegt. Einer der untersuchten Böden wurde schon vor 2500 Jahren überflutet, der andere vor etwa 540 Jahren.

Permafrost unter Wasser reagiert empfindlicher auf eine Klimaerwärmung und taut deshalb schneller als solcher an Land. Und zwar, weil Wasser mehr Wärme transportiert als Luft und weil das salzige Meerwasser in den Boden eindringt und dort den Taupunkt herabsetzt. Die arktischen Küsten sind stark vom Klimawandel betroffen. Der Anstieg des Meeresspiegels und einstürzende Küstenlinien durch tauenden Permafrost führen zu extremen Veränderungen der dortigen Umwelt. Wie das Mikrobiom in den Böden reagiert, ist noch weitgehend unbekannt.

Um mehr herauszufinden, hat das Team um Erstautorin Julia Mitzscherling Proben aus dem Porenwasser im Permafrostboden ausgewertet und im Boden gefundene Spuren des genetischen Materials der Mikroorganismen analysiert. Der zeitliche Abstand zwischen der Überflutung der beiden Kerne und deren Schichtung helfen einzuschätzen, wie sich die Mikrobengemeinschaften im Zeitverlauf entwickeln. Die Unterschiede zwischen beiden Kernen

zeigen, dass die Bakteriengemeinschaften erst sehr lange – bis zu Jahrtausende – nach der Überflutung durch Änderungen in ihrer Zusammensetzung und vermutlich auch durch Wachstum auf die Erwärmung reagieren und eine deutliche Reaktion auf die sich verändernde Umwelt einsetzt. Dass Mikroben in überfluteten Permafrostböden aus dem „Eiszeitschlaf“ erwachen und den zuvor gefrorenen Kohlenstoff mobilisieren, ist wahrscheinlich das Zukunftsszenario für große Teile der submarinen Permafrostgebiete. Was mit dem freigesetzten Kohlenstoff passiert, müssen weitere Studien zeigen.

Die Newsplattform EOS der American Geophysical Union AGU hat die in der Fachzeitschrift *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* veröffentlichten Ergebnisse als „Research Spotlight“ ausgezeichnet. So würdigt EOS die „besten zur Publikation akzeptierten Artikel“ aus einem AGU-Journal. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Mitzscherling, J., Winkel, M., Winterfeld, M., Horn, F., Yang, S., Grigoriev, M.N., Wagner, D., Overduin, P.P., Liebner, S. (2017): The development of permafrost bacterial communities under submarine conditions. - *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122, 1689-1704, DOI: 10.1002/2017JG003859.

Tauender Permafrost setzt altes Treibhausgas frei

Der auftauende Dauerfrostboden in arktischen Regionen könnte in doppelter Hinsicht zur Verstärkung des Treibhauseffekts führen: Zum einen erhöht sich mit wärmerer Umwelt die oberflächennahe Produktion des Treibhausgases Methan durch Mikroben. Zum anderen öffnet der tauende Untergrund zunehmend Austrittspfade für uraltes Methan. Das ist das Ergebnis einer Studie von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des GFZ, des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) und US-amerikanischen Partnern im kanadischen Mackenzie-Delta. Sie berichten davon im Fachjournal *Scientific Reports*.

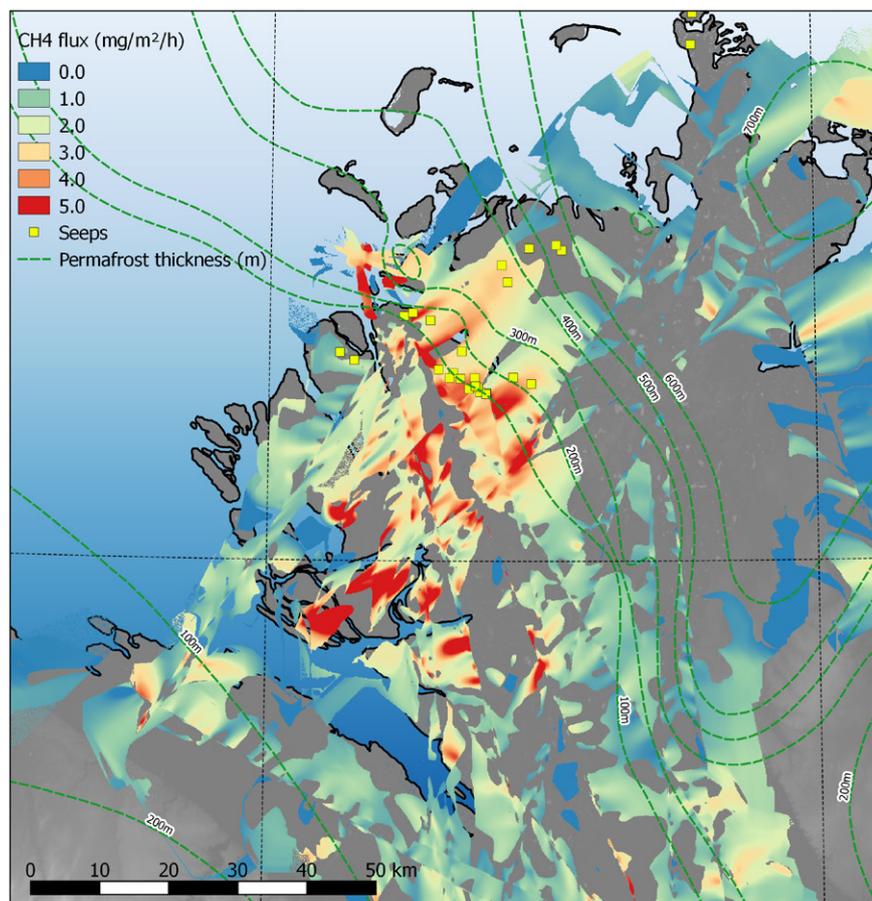
Der arktische Permafrost liegt wie ein gigantischer Deckel aus gefrorenem Material über Bodenschätzen und fossilen Energieträgern. Schon lange befürchtet die Klimaforschung, dass ein Auftauen dieses gefrorenen Bodens erhöhte Metha-

nemissionen nach sich ziehen könnte. Um herauszufinden, wie viel Methan aus einer Region austritt und ob es räumliche Muster in den Emissionen gibt, hat das Team unter Leitung von GFZ-Wissenschaftler Prof. Torsten Sachs ein 10 000 km² großes Gebiet im hohen Norden Kanadas untersucht. Mit dem Forschungsflugzeug Polar 5 vom AWI bestimmte das Team während zahlreicher Überflüge in den Sommern 2012 und 2013 kontinuierlich die Gaskonzentration der umgebenden Luft und meteorologische Größen.

Das Ergebnis war eine Karte der Methanemissionen mit einer Auflösung von je 100 x 100 m. Starke MethanAusgasungen traten genau dort auf, wo der Permafrost diskontinuierlich ist, das heißt, wo es schon Bereiche gibt, die dauerhaft aufgetaut sind. Die Forscherinnen und Forscher vermuten, dass der Großteil dieses Methans nicht aktuell von



Blick aus dem Fenster des Forschungsflugzeugs Polar 5 während der Messungen im Mackenzie Delta nördlich der Baumgrenze (Foto: T. Sachs, GFZ)



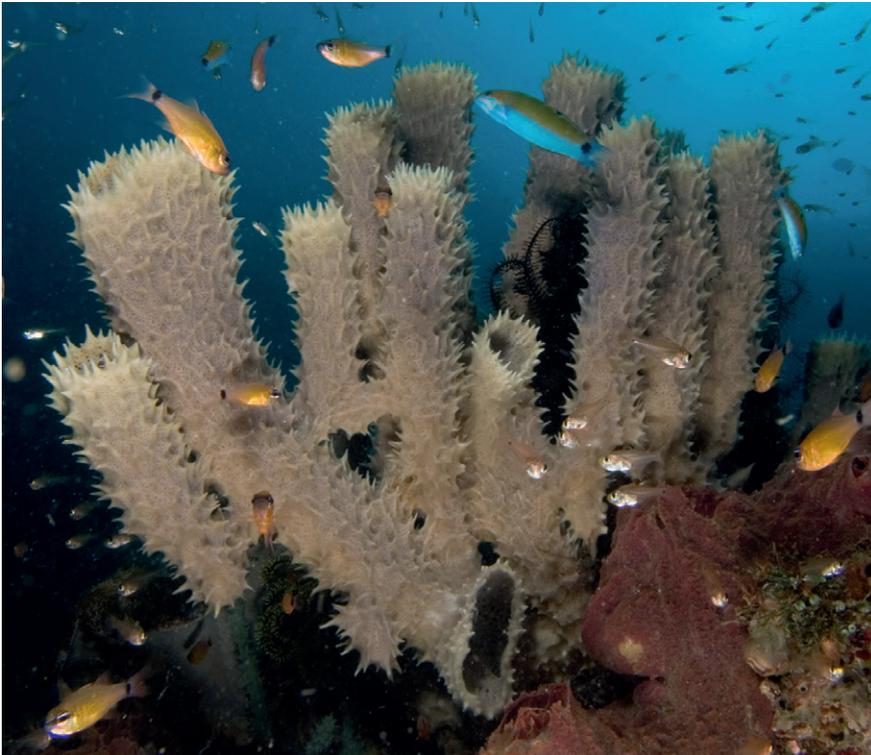
Darstellung der Methanemissionen im nördlichen Teil des untersuchten Gebiets (Abb.: B. Juhls, GFZ)

Mikroben produziert wird, sondern altes, aus Lagerstätten stammendes Gas ist – sogenanntes geologisches Methan, also Erdgas. Die Hotspots mit den größten Austritten von Gas machten zwar nur 1 % der Fläche des Mackenzie-Deltas aus, trugen aber schätzungsweise mit 17 % zur Gesamtemission des Treibhausgases in der Region bei.

Die in der Fachzeitschrift *Nature Scientific Reports* veröffentlichten Untersuchungsergebnisse legen nahe, dass das wärmer werdende Klima nicht nur die natürliche Produktion von Methan anregt, sondern auch vermehrt fossiles Gas freisetzen kann. Dies wiederum könnte erheblich zur Permafrost-Treibhausgas-Klima-Rückkopplung beitragen. Deshalb sei es nach Meinung der Autorinnen und Autoren wichtig, die Regionen, wo der Permafrost auftaut, künftig noch viel genauer zu beobachten als bisher. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Kohnert, K., Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J., Sachs, T. (2017): Strong geologic methane emissions from discontinuous terrestrial permafrost in the Mackenzie Delta, Canada. - *Nature Scientific Reports*, 7, 5828, DOI: 10.1038/s41598-017-05783-2.

Meeresschwämme als „Ökosystem-Ingenieure“



Schlauchschwamm (Foto: Nick Hobgood ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Callyspongia_sp._\(Tube_sponge\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Callyspongia_sp._(Tube_sponge).jpg)), „Callyspongia sp. (Tube sponge)“, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>)

Vor 550 Mio. Jahren vervielfachte sich die Anzahl der Tierarten auf der Erde explosionsartig. Was diesen dramatischsten aller bisherigen Ökosystemwandel auf unserem Planeten auslöste, ist bis heute umstritten. In den Geowissenschaften ist bekannt, dass zu diesem Zeitpunkt die Konzentration von freiem Sauerstoff in der Atmosphäre und im Meerwasser deutlich anstieg. Da mehrzellige Tiere Sauerstoff zum Atmen benötigen, war dieser Sauerstoffanstieg für deren Entstehung maßgeblich. Doch wodurch kam es zu diesem lebensnotwendigen Anstieg der Sauerstoffkonzentration in Meerwasser? Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ haben erstmals belegt, dass Meeresschwämme Änderungen im marinen Kohlenstoff- und Phosphorkreislauf verursachten, die zu einem Sauerstoffanstieg führten. Damit war die Grundlage für die weitere Ausbreitung von Mehrzellern bereitet, berichtet das Autorenteam im Fachmagazin *Nature Communications*.

Der Nachweis gelang durch Messungen der stabilen Siliziumisotope, also Untergruppen der chemischen Elemente, die sich durch ihre Atommasse unterscheiden. Silikatische Schwämme leben auf dem Meeresboden und hinterlassen nach ihrem Tod ihre siliziumreichen Skelettnadeln. Diese Nadeln bleiben nur sehr selten erhalten, wenn aus dem alten Meeresboden Gestein wird. Jedoch ist das Silizium dieser Nadeln in silikatischen Tonsteinen und Cherts (Feuersteine) überliefert. Die GFZ-Wissenschaftler Dr. Michael Tatzel und Prof. Friedhelm von Blanckenburg haben nun stabile Siliziumisotope mit einem modernen Massenspektrometer gemessen. Schwammnadeln enthalten im Vergleich mit dem umgebenden Silikatgestein mehr leichtes Silizium-28 als Silizium-30. Mit den Isotopenmessungen kann also die ehemalige Häufigkeit nicht mehr erhaltener silikatischer Schwämme im Sediment bestimmt werden. Die Rekonstruktionen zeigen eine ansteigende Häufigkeit silikatischer

Schwämme in Sedimenten, die zwischen dem Präkambrium und dem Kambrium am Kontinentalhang der heutigen Yangtze-Plattform in Südchina abgelagert wurden.

Doch was hat die Zunahme der Schwammhäufigkeit mit Sauerstoff zu tun? Dazu untersuchten sie eine Vielzahl geochemischer Indikatoren, die empfindlich auf die Sauerstoffkonzentration im Meerwasser reagieren. Sie fanden heraus, dass gleichzeitig mit den Schwämmen die Menge an gelöstem Sauerstoff zunahm und ebenso die Menge an im Sediment eingelagerten Kohlenstoff. Diese grundlegenden Änderungen resultierten aus der Lebensweise von Schwämmen. Sie filtrierte zur Nahrungsaufnahme organischen Kohlenstoff aus Meerwasser und verschoben damit die Oxidation organischen Kohlenstoffs in tiefere Wasserschichten oder erschwerten sie. Dies löste eine Kettenreaktion aus: Die steigende Sauerstoffkonzentration führte zur Bindung von Phosphaten im Sediment, daraus folgte eine verringerte Phosphorkonzentration im Meerwasser, und die wiederum reduzierte das Wachstum von Algen, bei deren Oxidation im Meerwasser gelöster Sauerstoff verbraucht wird.

Für die Hypothese, wonach Schwämme als Ökosystem-Ingenieure fungierten und Sauerstoffkonzentrationen in Meerwasser ansteigen ließen, liefert diese Studie nun erstmals stichhaltige Hinweise. Es ist gut möglich, dass dieser durch Schwämme verursachte Sauerstoffanstieg die benötigte Mindestkonzentration für mehrzellige Lebewesen überschritt und somit die explosionsartige Zunahme der Arten zu Beginn des Kambriums auslöste. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Tatzel, M., von Blanckenburg, F., Oelze, M., Bouchez, J., Hippler, D. (2017): Late Neoproterozoic seawater oxygenation by siliceous sponges. - *Nature Communications*, DOI: 10.1038/s41467-017-00586-5.

Klimakalender für die Saale-Eiszeit



Bohrung nach den uralten Sedimenten im früheren Vulkansee (Trockenmaar) in der Oberpfalz (Foto: Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Ein erst vor wenigen Jahren entdecktes Trockenmaar erweist sich als ein vollständiger Klimakalender für die vorletzte große Inlandsvereisung in Deutschland. Der frühere Vulkansee liegt unter einem Fichtenwald verborgen nahe dem oberpfälzischen Kurort Neualbenreuth. In seinen Ablagerungen können Geowissenschaftler wie in einem Archiv lesen.

Das Neualbenreuther Trockenmaar reiht sich zusammen mit dem erst vor zehn Jahren entdeckten Mýtina-Trockenmaar sowie den beiden schon länger bekannten Vulkanen Eisenbühl (Železná hůrka) und Kammerbühl (Komorní hůrka), alle drei auf tschechischem Gebiet, entlang einer tektonischen Störungszone auf. Eine Forschungsbohrung, die im Jahre 2015 vom Bayerischen Landesamt für Umwelt dort abgeteuft wurde, förderte 100 m mächtige Seeablagerungen zu Tage. Die geophysikalischen, sedimentologischen und geochemischen Analysen dieses Bohrkerns erfolgten am GFZ.

Pollenanalytische Untersuchungen an der Senckenberg Forschungsstation für Quartärpaläontologie Weimar lieferten dazu vegetationsgeschichtliche Daten.

Die gemeinsame Auswertung der ersten Ergebnisse ergab, dass die Eruption, die das Neualbenreuther Trockenmaar formte, vor rund 280 000 bis 300 000 Jahren erfolgt sein muss. Im Anschluss daran bildete sich ein See, der sich nach und nach mit Sedimenten füllte und vor etwa 85 000 Jahren verlandete. Somit bietet dieses neu entdeckte Klimaarchiv detaillierte Informationen zur Umweltgeschichte während der vorletzten Eiszeitperiode, der Saale-Kaltzeit und der sich anschließenden Eem-Warmzeit. Aufgrund der eiszeitlichen Gletschervorstöße bis ins nördliche Mitteleuropa ist hier die Vegetations- und Klimaentwicklung der Saale-Kaltzeit bislang nur bruchstückhaft dokumentiert. Anhand des Neualbenreuther Bohrkerns haben die Forschenden nun erstmals drei aufeinander folgende ausgeprägte

Warmphasen innerhalb der Saale-Kaltzeit für Mitteleuropa nachgewiesen, in denen Laubmischwälder mehrfach die eiszeitliche Kältsteppe ablösten.

Die vorliegenden Ergebnisse sind Teil eines gerade anlaufenden internationalen Forschungsprojekts, größtenteils gefördert durch das Internationale Kontinentale Tiefbohrprogramm (ICDP), in dessen Rahmen weitere Untersuchungen zur aktiven Geodynamik (Schwarmbeben, Magmenaufstieg, Vulkanismus), zur Aktivität der tiefen Biosphäre sowie zur Klimadynamik im deutsch-tschechischen Grenzgebiet geplant sind. ■

Nähere Informationen zum internationalen Forschungsprojekt:

<http://www.icdp-online.org/projects/world/europe/eger-czechia-germany/>

Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Rohrmüller, J., Kämpf, H., Geiß, E., Großmann, J., Grun, I., Mingram, J., Mrlina, J., Plessen, B., Stebich, M., Veress, C., Wendt, A., Nowaczyk, N. (2017): Reconnaissance study of an inferred Quaternary maar structure in the western part of the Bohemian Massif near Neualbenreuth, NE-Bavaria (Germany). - *International Journal of Earth Science* (Geologische Rundschau), DOI: 10.1007/s00531-017-1543-0.

Der Zeitpunkt für Hochwasser verschiebt sich und zeigt den Einfluss des Klimawandels



Elbe-Hochwasser in Dresden, Juni 2013
(Foto: Dr. Bernd Gross (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elbe-Hochwasser_in_Dresden-Juni_2013-57.JPG), <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>)

Der Klimawandel ist abstrakt, Wetterereignisse wie Starkregen, die Fluten auslösen, sind konkret. Lässt sich beides in Verbindung bringen? Eine im Fachjournal *Science* veröffentlichte internationale Studie unter Leitung der Universität Wien, an der auch das GFZ beteiligt ist, belegt nun erstmals einen für einen gesamten Kontinent beobachtbaren Zusammenhang zwischen Klimawandel und Hochwassern.

Bei einem extremen Hochwasserereignis wird oft die Frage gestellt, ob der Klimawandel die Ursache ist. Das Klima ist jedoch eine statistische Größe und bezeichnet Trends im Auftreten von Wetterereignissen über mindestens 30 Jahre. Einzelereignisse können also nicht durch den Klimawandel begründet werden. Nur die Beobachtung über einen längeren Zeitraum kann Aufschluss über Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Wetterereignissen geben. In einem internationalen Großprojekt hat das Team um Erstautor Prof. Günter Blöschl, Universität Wien, Datensätze der letzten fünfzig Jahre von über 4000 hydrometrischen Messstationen aus 38 europäischen Ländern gesammelt und ausgewertet. Prof. Bruno Merz, Leiter der GFZ-Sektion Hydrologie, hat im Rahmen der Studie die Ergebnisse im Hinblick auf die Ursachen von Flutereignissen interpretiert, sowohl für Deutschland als auch insgesamt für Europa. Das Auftreten der Fluthochwasser hat sich demnach über die Jahre zeitlich verschoben. Je nach Ursache der Hochwasserereignisse

treten diese in manchen Regionen immer früher auf, in anderen immer später. Und da liegt der Link zum Klimawandel. Denn die Ursachen hinter den zeitlichen Verschiebungen im Auftreten der Hochwasserereignisse lassen sich auf Klimaveränderungen zurückführen. Die Intensität der Hochwasserereignisse hingegen, also beispielsweise die Höhe des Wasserstands oder der Abfluss, eignet sich eher nicht dafür, den Einfluss des Klimawandels zu ermitteln. Sie hängt nämlich nicht nur vom Klima ab. So können etwa die Versiegelung von Flächen durch Bebauung, intensive Landwirtschaft oder auch der Rückgang von wasserspeichernden Auwäldern einen Einfluss auf die Intensität haben.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben für jede Region den Zeitpunkt der Fluthochwasser und deren Ursachen ermittelt. Dabei zeigte sich im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte eine deutliche zeitliche Verschiebung: Beispielsweise treten die Hochwasser im Nordosten Europas heute im März und damit um einen Monat früher auf als noch in den 1960er und 70er Jahren. Die Ursache: Der Schnee schmilzt heute früher als damals. An den Atlantikküsten Westeuropas führt der Klimawandel dazu, dass früher im Jahr das Maximum an Bodenfeuchte erreicht ist, der Boden also kein weiteres Wasser mehr aufnehmen kann und damit Fluten begünstigt werden. In England und Norddeutschland hingegen kommt das Hochwasser heute um etwa

zwei Wochen später. Als Ursache machte das Autorenteam hier eine Veränderung in der atmosphärischen Verteilung von Luftdrücken aus, die sich ebenfalls auf den Klimawandel zurückführen lässt. Sie hat zur Folge, dass die Regen bringenden Winterstürme später auftreten. In Teilen der Mittelmeerküste führt die Erwärmung des Atlantiks dazu, dass viel Wasser verdunstet, die Atmosphäre viel Feuchtigkeit aufnimmt und vom Atlantik in Richtung Mittelmeer transportiert und dort die stärksten Fluten später im Jahr auftreten.

Die Verschiebung der Zeitpunkte, zu denen an verschiedenen Orten in Europa Hochwasser auftreten, hat also unterschiedliche Ursachen. Alle diese Ursachen lassen sich jedoch auf Veränderungen des Klimas zurückführen. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in:
Blöschl, G., Merz, B. et al. (2017):
Changing climate shifts timing of
European floods. - *Science*, 357, 6351,
588-590, DOI: 10.1126/science.aan2506.

Änderungen der Wasserspeicherung in der Landschaft mit der Waage bestimmen



Das supraleitende Gravimeter im geodätischen Observatorium Wettzell im Bayrischen Wald (Foto: S. Schröder, GFZ)

Das System Erde ist hochkomplex, es besteht aus einer Vielzahl ineinandergreifender Kreisläufe. Für die Forschung ist es deshalb eine besondere Herausforderung, Mengenverteilungen, also die Bilanzen von Energie- und Stoffflüssen, in der Umwelt zu bestimmen. Wissenschaftler des GFZ haben zusammen mit Kollegen aus dem Berliner Senat, dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie und der Universität Potsdam nun gezeigt, dass sich die Wasserbilanz in der Landschaft „wiegen“ lässt.

Innerhalb des Wasserkreislaufs ist die Kenntnis über die Menge des gespeicherten Wassers von besonderer Bedeutung. Sie bestimmt, wieviel Wasser sich im aktiven Teil des Kreislaufs befindet und damit den Austauschprozessen zwischen Atmosphäre, Landflächen und Ozeanen unterliegt. Wasser ist weltweit – insbesondere in trockenen Regionen – eine wichtige Ressource. Das Wissen darüber, wieviel Wasser beispielsweise der Untergrund speichert, ist die Basis eines nachhaltigen Wassermanagements.

Wasser kommt in der Landschaft in vielen Teilspeichersystemen vor, wie der Pflanzenbiomasse, den Böden, dem Grundwasser, der Schneebedeckung oder den Oberflächengewässern. Sie müssten theoretisch einzeln überwacht werden, um Änderungen in der Gesamtmenge an gespeichertem Wasser zu bestimmen. Seit einigen Jahren beobachtet die Satellitenmission GRACE, an

der auch das GFZ beteiligt ist, Änderungen in der Wasserbilanz. Die gewonnenen Daten haben jedoch nur eine geringe zeitliche und räumliche Auflösung. Das Team um Prof. Andreas Güntner hat deshalb einen eher ungewöhnlichen Ansatz gewählt, um Wassermengen zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in der Fachzeitschrift *Hydrology and Earth System Sciences* veröffentlicht. Für über ein Jahr hat das Team im geodätischen Observatorium Wettzell im Bayrischen Wald ein hochpräzise messendes Gravimeter installiert. In diesem Messinstrument erzeugen supraleitende Spulen ein elektromagnetisches Feld, in dem eine Metallkugel als Testmasse schwebt. Jede Bewegung der Testmasse wird genau registriert. So nimmt das Gravimeter Veränderungen in der Erdschwere wahr, die durch Massenveränderungen verursacht werden. Sie lassen sich als Änderung in der gespeicherten Wassermenge deuten. Das Gravimeter funktioniert also ähnlich einer Waage.

Massenänderungen unterhalb und oberhalb des Gerätes fließen in die Messung ein. So lässt sich mit dem Gravimeter auch die Verdunstung überwachen: Wasser, das durch die „Atmung“ der Pflanzen oder von der Erdoberfläche verdunstet, leert die Wasserspeicher. Messungen der aktuellen Verdunstung waren bisher nur eingeschränkt möglich. Sie sind aber von großer Bedeutung, zum Beispiel um zu erforschen, wie Pflanzen auf Umweltveränderungen wie

Temperaturerhöhungen oder Wasserstress reagieren.

Die Studie zeigt erstmals, dass ein hochsensitives Instrument wie ein supraleitendes Gravimeter nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch unter stark schwankenden Wetter- und Umweltbedingungen im Geländeeinsatz kontinuierlich und hochgenau misst. Eine derart umfassende Messung von Veränderungen in der Wasserspeicherung in der Landschaft gab es bisher nicht. Die Studie zeigt auf, wie Gravimeter künftig als hydrologische Messinstrumente im Gelände eingesetzt werden können. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Güntner, A., Reich, M., Mikolaj, M., Creutzfeldt, B., Schroeder, S., Wziontek, H. (2017): Landscape-scale water balance monitoring with an iGrav superconducting gravimeter in a field enclosure. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3167-3182, DOI: 10.5194/hess-21-3167-2017.

Havel und Spree: Schon vor über achthundert Jahren vom Menschen geprägt



Luftaufnahme der Dominsel, Stadt Brandenburg (Foto: J. Wacker, Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum)

Der Mensch formt seine Umwelt, und das nicht erst seit der jüngeren Vergangenheit. Im seit Jahrtausenden besiedelten Mitteleuropa ist oftmals nur noch schwer zu bestimmen, wie eine Landschaft im naturbelassenen Zustand aussähe. Hier hat der Mensch die Naturlandschaft zu einer Kulturlandschaft überprägt, mit Auswirkungen auch auf künftige Nutzungen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter der Leitung des GFZ haben in einer interdisziplinären Studie den menschlichen Einfluss auf das Flusssystem von Havel und Spree im Raum Berlin-Stadt Brandenburg untersucht. Sie zeigten, dass schon im Hochmittelalter massiv in die Flussläufe eingegriffen wurde.

Die Europäische Gemeinschaft fordert von ihren Mitgliedern die Erhaltung und unter Umständen auch die Renaturierung von Flusslandschaften. Ziel ist ein „guter ökologischer Status“ von Gewässern. Da insbesondere Ballungsräume schon auf eine Jahrhunderte oder gar Jahrtausende alte Nutzungsgeschichte zurückblicken, ist diese Forderung nicht ohne weiteres umsetzbar. Denn: Wie sieht der „gute ökologische Status“ aus, zu dem eine Flusslandschaft entwickelt werden soll? Unter Umständen erweist sich ein als „natürlich“ angesehener Zustand eines Ökosystems bei näherer Betrachtung als durch den Menschen geformt.

Um herauszufinden, wie sich das Flusssystem von Havel und Spree in der Vergangenheit entwickelt hat, untersuchte das Team um Erstautor Dr. Knut Kaiser vom GFZ die Flussgeschichte der vergangenen 2000 Jahre. Die Ergebnisse sind in der Fachzeitschrift *Geoarchaeology* veröffentlicht.

Das Team hat erstmals die Entwicklung des Wasserspiegels von Seen im Flusssystem der mittleren Havel und der mit ihr verbundenen Spree systematisch ausgewertet und Seespiegelschwankungen der vergangenen 2000 Jahre rekonstruiert. Dafür haben die Forschenden auf Daten zurückgegriffen, die im Zusammenhang mit archäologischen Ausgrabungen und paläo-ökologischen Untersuchungen erhoben wurden. So zeigen beispielsweise in Sedimenten gefundene und zeitlich eingeordnete Reste von Pflanzen an, ob das Gelände zu einem bestimmten Zeitpunkt von Wasser- oder Landpflanzen bewachsen war und ein Bereich somit unter oder über Wasser lag.

Die Daten deuten darauf hin, dass der Wasserspiegel im Hochmittelalter vor etwa 800 Jahren um etwa 1,5 m anstieg. Als Ursache fand das Team heraus, dass die mittlere Havel über eine Länge von etwa 150 km in Abschnitten aufgestaut wurde, um Wassermühlen anzutreiben, mit massiven Auswirkungen auf das Flussökosystem. Große Teile des vormals stark von Mooren geprägten Gebiets wurden überflutet und bereits vorhandene Seen vergrößerten sich. Andere zuvor trockene Bereiche wandelten sich wiederum zu Mooren.

Für Renaturierungsvorhaben bedeuten diese Ergebnisse, dass der „natürliche“ Zustand eines Flusses mit äußerster Umsicht und unter Berücksichtigung langer Zeiträume bestimmt werden muss. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Kaiser, K., Keller, N., Brande, A., Dalitz, S., Hensel, N., Heußner, K.-U., Kappler, C., Michas, U., Müller, J., Schwalbe, G., Weiße, R., Bens, O. (2017): A large-scale medieval dam-lake cascade in central Europe: Water level dynamics of the Havel River, Berlin-Brandenburg region, Germany. - *Geoarchaeology*, DOI: [10.1002/geo.21649](https://doi.org/10.1002/geo.21649).

Internationale Zusammenarbeit

In der internationalen Kooperation des GFZ haben die europäischen Nachbarländer einen traditionell hohen Stellenwert. Mit **Italien** und **Frankreich** konnte die bilaterale Zusammenarbeit in jüngster Zeit weiter intensiviert werden. Im Vordergrund stehen interdisziplinäre Themen, die die verstärkte institutionelle Einbindung sowohl des Forschungsbereichs Erde und Umwelt der Helmholtz-Gemeinschaft als auch des Geo.X-Netzwerks zum Ziel haben. So wurde unter Federführung des GFZ ein Kooperationsabkommen zwischen der Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) und der Helmholtz-Gemeinschaft geschlossen. Ziel des Abkommens ist es, die Zusammenarbeit in der Erdsystem- und Umweltforschung, z. B. durch die gemeinsame Nutzung von Forschungsinfrastrukturen und den Austausch von wissenschaftlichen Nachwuchskräften zu intensivieren. Thematisch stehen u. a. neue Verfahren und Technologien für die biotechnologische Pflanzennutzung und die Verminderung von Georisiken im Fokus. Mittelfristig soll die Zusammenarbeit um weitere Forschungsfelder erweitert werden, wobei die gemeinsame Ausgestaltung europäischer Forschungsprogramme ein prioritäres Ziel ist. Der bereits 1923 gegründete CNR ist die größte außeruniversitäre Forschungsorganisation in Italien. Mehr als 4000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler betreiben in über 100 Instituten internationale Spitzenforschung.

Frankreich ist der wichtigste internationale Partner des GFZ. Aktuell bestehen rund 50 bilaterale Kooperationsabkommen mit dem Nachbarland; 20 französische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten am GFZ. Am 11. und 12. September 2017 organisierte das Internationale Büro des GFZ gemeinsam mit der Französischen Botschaft in Berlin das Symposium „Earth System Dynamics – New Prospects for bilateral French-German Cooperation“. Über 50 Forschende aus 15 Universitäten und Forschungseinrichtungen beider Länder diskutierten Entwicklungsperspektiven der bilateralen Zusammenarbeit in der Erdsystem- und Energieforschung. Die Veranstaltung orientierte sich damit thematisch an der deutsch-französischen Forschungsinitiative „Make our Planet Great Again“,

das die internationale Forschungskoope-ration in der Erdsystem- und Energiefor-schung nachhaltig fördern soll. In dem Abschlussdokument („White Paper“) sind zukünftige gemeinsame Forschungsthe-men und -projekte definiert, die auch in die Vorbereitung des deutsch-französischen Wissenschaftsforums 2018 eingebracht wurden. Das Symposium „Earth System Dynamics“ war ein Ergebnis des Besuchs des Französischen Botschafters Philippe Etienne am 4. November 2016 am GFZ.



Die Teilnehmenden des EOS-Workshops am 22./23. März 2017 (Foto: E. Gantz, GFZ)

Eine weitere Facette der internationalen Zusammenarbeit ist die Anbahnung bilateraler Kooperationen mit solchen Ländern und Institutionen, die für die erfolgreiche Umsetzung des GFZ-Forschungsportfolios eine wichtige Rolle spielen, bislang aber nicht im Fokus des GFZ stehen. In diesem Rahmen trafen sich am 22./23. März 2017 Forschende des GFZ und des Earth Observatory Singapore (EOS) zu einem zweitägigen Symposium am GFZ.

EOS wurde vor acht Jahren als Exzellenzzentrum der Nanyang Technological University (NTU) in **Singapur** gegründet. Im Fokus zukünftiger Projektkooperationen von GFZ und EOS steht der Austausch von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ebenso wie die gemeinsame Nutzung der exzellenten Infrastruktureinrichtungen. Ein im Nachgang zu dem Workshop unterzeichnetes Memorandum of Understanding (MoU) regelt die zukünftige gemeinsame Zusammenarbeit. Thematisch stehen Georisiken, wie z. B. die Vulkan- und Erdbebenforschung sowie die Klimaforschung im Zentrum des gemeinsamen Interesses. Regionaler Fokus wird Südostasien sein.

Dem Workshop vorausgegangen war ein Besuch des Wissenschaftlichen Vorstands des GFZ, Prof. Reinhard Hüttel, im August 2016 an der NTU in Singapur.

Im unmittelbaren Zusammenhang zu den Kooperationsaktivitäten mit EOS steht die Zusammenarbeit mit Myanmar. Für das Verständnis von Erdbebenprozessen im tektonisch aktiven Himalaya ist **Myanmar** eine Schlüsselregion. Nach der politischen Öffnung des Landes bietet sich nun die Möglichkeit zur wissenschaftlichen Zusammenarbeit. Ein Besuch von GFZ-Vertretern im November 2017 in Rangun und Naypyitaw lotete entsprechende Möglichkeiten aus. Gemeinsam mit dem Department for Meteorology and Hydrology sollen z. B. stationäre und permanente Messgeräte zur seismischen Aktivität in dem erdbebengefährdeten Land installiert werden. Damit werden bislang noch bestehende Lücken des weltweiten GEOFON-Netzes des GFZ geschlossen. Das Vorhaben ist Teil eines internationalen Großprojekts, an dem das EOS, das GFZ sowie chinesische und amerikanische Forschungseinrichtungen teilnehmen. Ein weiterer Schwerpunkt der Zusammenarbeit wird die Aus- und Weiterbildung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie technischen Fachkräften aus der Region sein.

Eine wichtige Region für das Verständnis geowissenschaftlicher Fragestellungen in Südostasien ist **Taiwan**. Wie in einem natürlichen Labor lassen sich hier Erdbebenprozesse und Mechanismen für Bergstürze



Unterschrift: Das Multihazard Early Warning Centre (links) und die erste permanente GEOFON-Station des GFZ in Myanmar am Early Warning Centre (rechts) in Naypyitaw, Myanmar (Fotos: L. Stroink, GFZ)

und Hangrutschungen studieren. Ähnlich wie Chile und Zentralasien richtet das GFZ daher nun auch in Taiwan ein „Earth System Observatory“ ein. Es wird gemeinsam mit taiwanesischen Forschungseinrichtungen, wie der Taiwanesischen Akademie der Wissenschaften und der National Taiwan University betrieben. Ab 2018 wird das GFZ zudem in dem renommierten Dragon-Gate-Programm des taiwanesischen Ministeriums für Wissenschaft und Technologie (MoST), antragsberechtigt sein. Damit wird es erstmals möglich, exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Taiwan zu Forschungsaufenthalten an das GFZ nach Potsdam einzuladen.

Die Kooperation mit **Kolumbien** wurde nach der erfolgreichen Aufnahme der Geowissenschaften in das Portfolio der Wissenschaftlich-Technologischen Zusammenarbeit (WTZ) mit Deutschland im Jahr 2017 weiter intensiviert. Ein inzwischen positiv beschiedener Antrag an das BMBF erlaubt es, 2018 das Projekt „NEXCOA Naturgefahren und Extremereignisse in den kolumbianischen Anden“ mit einem Workshop in Bogota auf den Weg zu bringen. Partner sind der Geologische Dienst und die Universidad Nacional de Bogota. Nach dem erfolgreichen Friedensprozess steht Kolumbien vor einem politischen und wirtschaftlichen Neuanfang, der eine langfristig angelegte Forschungskoope- ration mit dem Land begünstigt. Die zukünftige Zusammenarbeit soll insbesondere junge Talente fördern, denn sie werden die eigent- lichen Treiber dieses Neuanfangs sein. Eine langfristige Zusammenarbeit mit Kolumbi- en stärkt darüber hinaus das bestehende südamerikanische Netzwerk des GFZ durch wichtige inhaltliche Komponenten und neue Leistungsträger. Von diesen Synergi- en werden nicht nur die deutschen, sondern auch die kolumbianischen Partner sowie die Anrainerstaaten nachhaltig profitieren. Zudem besitzt das Land exzellente Univer- sitäten und Forschungseinrichtungen, mit hervorragend ausgebildeten Wissenschaft- lerinnen und Wissenschaftlern und einer Vielzahl wissenschaftlicher Datensätze.



Symposium zur deutsch-russischen Kooperation in der Erdsystemforschung in der Deutschen Botschaft Moskau. Die kleinen Fotos oben zeigen von links nach rechts: Gregorij Trubnikov, Vize- minister für Wissenschaft und Bildung der Russischen Föderation, Reinhard Hüttl, GFZ, Christian Görke, Stellvertretender Ministerpräsident des Landes Brandenburg, Beate Grzeski, Gesandtin der Deutschen Botschaft Moskau; Foto unten: Paneldiskussion (Fotos: S. Tepljakow)

Im Rahmen des 2016 prämierten GFZ- Konzepts zum DFG-Wettbewerb „International Research Marketing“ wurden 2017 u. a. zwei Veranstaltungen in Kooperation mit den deutschen Botschaften in Muscat (Oman) und in Moskau (Russland) durchgeführt. Im Rahmen des Symposiums zur deutsch-russischen Kooperation in der Erdsystemforschung, am 23./24. November 2017 in der Deutschen Botschaft in Moskau, präsentierten das GFZ und die Regierung des Landes Brandenburg den Wissenschafts- und Forschungsstandort Potsdam/Berlin. ■

Ausgezeichnet

Charlotte Krawczyk in DFG-Senatskommission Erdsystemforschung berufen



Prof. Charlotte Krawczyk, Direktorin des GFZ-Departments Geophysik, ist in die neu gegründete Senatskommission „Erdsystemforschung“ (SKE) der Deutschen

Forschungsgemeinschaft DFG berufen worden. Nach Auslaufen der Senatskommission für Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften soll die neue Kommission die in vielen verschiedenen Fachgebieten angesiedelte erdwissenschaftliche Forschung zu einer ganzheitlichen Erdsystemforschung bündeln und eine Forschungsagenda entwickeln. Die Kommission übernimmt zudem eine Beratungsfunktion zu zukünftigen Forschungsinfrastrukturen, -einrichtungen und forschungspolitischen Vorgaben. Neben ihrer Position als Departmentdirektorin am GFZ leitet Charlotte Krawczyk die GFZ-Sektion Oberflächennahe Geophysik und ist Professorin für Geophysik an der TU Berlin. ■

Neue Sektion Magnetosphärenphysik



Zum 1. Juli 2017 wurde die neue GFZ-Sektion Magnetosphärenphysik unter Leitung von **Prof. Yuri Shprits** gegründet. Yuri Shprits war zunächst in der Sektion Erdmagnetfeld

tätig, die nun in Geomagnetismus umbenannt wurde. Shprits konnte im Rahmen der Helmholtz-Rekrutierungsinitiative für eine Forschungstätigkeit in Deutschland gewonnen werden und wechselte im März 2016 von der University of California, Los Angeles (UCLA), USA, ans GFZ. Im gleichen Jahr wurde er auf eine Professur an die Universität Potsdam berufen. Der Weltraumphysiker erforscht mit seinem Team den Einfluss der Sonnenaktivität auf die Erdatmosphäre und den erdnahen Weltraum sowie auf die Gefährdung für Satelliten und Menschen im All. Hierfür verwendet Yuri

Shprits Satellitenmessdaten und Beobachtungen von Bodenstationen zum erdnahen Weltraum und zur Magnetosphäre sowie physikalische Modellierungen und Datenassimilationstechniken. ■

Brian Horsfield erhält AAPG Europe Region Award



Prof. Brian Horsfield wurde mit dem AAPG Europe Energy Geoscience Research Award für 2017 von der American Association of Petroleum Geologists (AAPG) ausgezeichnet.

Brian Horsfield erhielt den Preis aufgrund seines „maßgeblichen Beitrags zur wissenschaftlichen und technischen Weiterentwicklung der Erdölexploration in mehr als 35 Jahren Arbeitserfahrung“. Horsfield war von 2001 bis April 2017 Leiter der GFZ-Sektion Organische Geochemie. In dieser Zeit war er zeitweise Departmentleiter und Vorsitzender des Wissenschaftlichen Rates am GFZ. Außerdem ist er emeritierter Professor für Organische Geochemie und Kohlenwasserstoffsysteme an der TU Berlin.

Die AAPG ist der weltweit erste Zusammenschluss von Erdöl-Explorationsgeologen. Ihr Ziel ist die Förderung der Geologischen Wissenschaften und die Unterstützung der technischen Weiterentwicklung in diesem Feld. Sie umfasst 40 000 Mitglieder in 129 Ländern. ■

ICDP-Vorsitz an Axel Liebscher übertragen



Prof. Brian Horsfield und Dr. Axel Liebscher in Kiruna (Foto: U. Harms, GFZ)

Auf der Tagung des Vorstands des International Continental Scientific Drilling Program ICDP in Kiruna, Schweden, wurde am 7. Juni 2017 der Vorsitz des Executive

Committee von **Prof. Brian Horsfield**, dem ehemaligen Leiter der GFZ-Sektion Organische Geochemie, an **Dr. Axel Liebscher**, den Leiter der GFZ-Sektion Geologische Speicherung, übertragen.

Axel Liebscher ist seit 2000 am GFZ und hat sich 2008 an der TU Berlin in Petrologie, Mineralogie und Geochemie habilitiert. Er war bisher unter anderem wissenschaftlicher Koordinator des Pilotstandorts Ketzin, dem europaweit größten Forschungsprojekt zur geologischen Speicherung des Treibhausgases Kohlendioxid.

Brian Horsfield zieht sich auf eigenen Wunsch nach sechs erfolgreichen Jahren vom Vorsitz des Executive Committee zurück. Unter seiner Leitung wurden zwölf ICDP-geförderte Bohrprojekte durchgeführt, mehrere neue Mitglieder gewonnen und die Verbindung zu Partnerorganisationen wie dem International Ocean Discovery Program IODP und dem Deep Carbon Observatory DCO gefestigt. Im Jahr 2013 richtete sich das ICDP unter dem Vorsitz von Horsfield strategisch neu aus, um die gesellschaftliche Relevanz von ICDP-Projekten stärker in den Fokus zu rücken. ■

Liane G. Benning zum Mitglied der Academia Europaea ernannt



Prof. Liane G. Benning, Leiterin der GFZ-Sektion Grenzflächen-Geochemie, wurde zum Mitglied der Academia Europaea (AE) ernannt. Die AE ist eine europäische regierungsunabhängige Gesellschaft, die sich

der Förderung von „herausragender wissenschaftlicher Leistung“ verschrieben hat. Gegründet im Jahr 1988, hat die Gesellschaft aktuell rund 3740 Mitglieder, darunter führende Expertinnen und Experten der Human-, Wirtschafts- und Naturwissenschaften. Liane G. Benning ist neben ihrer Position am GFZ Professorin für Interface Geochemistry an der FU Berlin und Professorin für Experimentelle Biogeochemie an der University of Leeds, Großbritannien. ■

Harald Schuh zum Mitglied der acatech ernannt



Prof. Harald Schuh, Direktor des Departments Geodäsie, ist jetzt auch Mitglied der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Er und 25 weitere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wurden auf der Mitgliederversammlung am 17. Oktober 2017 gewählt. Die Wahl ist zugleich eine Auszeichnung ihrer wissenschaftlichen Leistung und ein ehrenamtliches Mandat: Die von Bund und Ländern geförderte Akademie berät Politik und Gesellschaft in technologiebezogenen Fragen.

In interdisziplinären Projekten arbeiten die Mitglieder der acatech mit Expertinnen und Experten aus Wirtschaft und Gesellschaft zusammen und entwickeln Handlungsoptionen und -empfehlungen für Politik und Gesellschaft. Die Projektthemen reichen dabei von Energieversorgung über Digitalisierung und Industrie 4.0 bis hin zur Technikkommunikation.

Harald Schuh ist neben seiner Funktion als Direktor des Departments Geodäsie auch Leiter der GFZ-Sektion Geodätische Weltraumverfahren sowie Leiter des Lehrstuhls Satellitengeodäsie am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik an der Technischen Universität Berlin. ■

Goldenes Lot 2017 für Tsunami-Frühwarnsystem



Am 3. November 2017 wurde **Dr. Jörn Lauterjung**, Leiter der Daten- und IT-Dienste am GFZ, vom Verband Deutscher Vermessungsingenieure (VDV) mit dem „Goldenen Lot“

ausgezeichnet. Er empfing den Preis als Projektkoordinator des Projekts GITEWS (German-Indonesian Tsunami Early Warning System), aus dem ein Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean hervorging. Das Projekt wurde federführend durch das

GFZ im Auftrag der Bundesregierung entwickelt, nachdem ein Seebeben im Indischen Ozean der Stärke 9,3 am 26. Dezember 2004 einen verheerenden Tsunami auslöste. Dank der Arbeit von Jörn Lauterjung und seinem Team gilt GITEWS heute als eines der modernsten Tsunami-Frühwarnsysteme der Welt. Das System ging im Jahr 2008 in Testbetrieb und wurde 2011 an die indonesische Regierung übergeben. Erdbebenmeldungen und Tsunami-Warnungen werden weniger als fünf Minuten nach einem Beben ausgegeben. Seit der Inbetriebnahme wurden in Indonesien tausende Erdbeben und mehr als zehn Tsunami registriert. ■

Stefano Parolai ist neuer Direktor am OGS in Triest



Zum 1. September 2017 übernahm **Prof. Stefano Parolai**, bisher Leiter des GFZ-Zentrums für Frühwarnsysteme, die Position des Direktors am Center for Seismological Research (CSR) am National Institute of Oceanography and Experimental Geophysics (OGS) in Triest, Italien. Beide

Einrichtungen, GFZ und OGS, planen in der Zukunft stärker zu kooperieren.

Neben seiner Position am GFZ war Stefano Parolai Professor der Ingenieurseismologie, Oberflächenwellenanalyse und Inversionsmethoden an der TU Berlin. Er ist Generalsekretär der Europäischen Seismologischen Kommission, ESC in Triest. Seine Forschungsschwerpunkte lagen am GFZ auf der Entwicklung von Erdbeben-Frühwarnsystemen, insbesondere in Europa und den Mittelmeerstaaten, und von Methoden zur Bestimmung der Variabilität von Bodenbewegungen auf kurzen Distanzen, ausgelöst durch Erdbeben. Er beschäftigte sich außerdem mit zahlreichen Aspekten der Erdbebenrisikobewertung und Schadensregulierung sowie der Interaktion zwischen verschiedenen Georisiken und deren Folgen. ■

Dirk Scherler erhält ERC Starting Grant



Prof. Dirk Scherler vor dem schuttbedeckten Bara Shigri-Gletscher im indischen Himalaya (Foto: R. Thiede)

Dirk Scherler, Junior-Professor in der GFZ-Sektion Geochemie der Erdoberfläche, hat eine Förderung des Europäischen Forschungsrats ERC zugesprochen bekommen. Der ERC-Starting-Grant ist mit rund 1,5 Mio. Euro dotiert und wurde für das Projekt „Climate sensitivity of glacial landscape dynamics“ (COLD) vergeben. Mit seinem Projekt möchte Scherler herausfinden, wie Erosionsraten in Hochgebirgslandschaften mit Klimaveränderungen variieren und wie diese Änderungen die Dynamik von Gebirgsgletschern beeinflussen. Scherlers Hauptaugenmerk wird auf eisfreien Hängen liegen, wie sie in den steilen Hochgebirgsregionen der Alpen und im Himalaya sehr häufig vorkommen. Das Gesteinsmaterial solcher Hänge landet oft auf der Oberfläche von Gletschern und reduziert dort das Abschmelzen. Aus diesem Grund ist die Reaktion von schuttbedeckten Gletschern auf den Klimawandel abhängig von der Reaktion der eisfreien Hänge darüber. Es ist jedoch sehr schwierig, die Erosionsraten dieser Hänge zu quantifizieren. Mit dem ERC-Grant will Scherler durch Analyse von kosmogenen Nukliden, mathematische Modellierungen und globale Satellitenfernerkundung die Temperatur-„Empfindlichkeit“ der Hangerosion in glazial geprägten Landschaften abschätzen. ■

Benedikt Soja erhält den Ehrenring der Republik Österreich

Der ehemalige GFZ-Doktorand **Benedikt Soja**, vormals GFZ-Sektion Geodätische Weltraumverfahren, jetzt NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA, erhielt am 16. Mai 2017 den Ehrenring der Republik Österreich. Der Ehrenring wird durch den österreichischen Bundespräsidenten Alexander van der Bellen für Sub-auspiciis-Promotionen verliehen, um Bestleistungen



V.l.n.r.: Dekan der Fakultät für Mathematik und Geoinformation der TU Wien, Prof. Michael Drmota, Max Riegler, Michael Hofbauer, Martin Puhl, Rektorin Prof. Sabine Seidler, Staatssekretär Dr. Harald Mahrer in Vertretung von Bundespräsident Alexander Van der Bellen, Martina Lindorfer, Roland Bliem, Benedikt Soja (Foto: T. Blazina, TU Wien)

in Schule und Studium zu würdigen. Es ist die höchstmögliche Auszeichnung von Studienleistungen in Österreich. Benedikt Soja war von 2013 bis 2016 Doktorand am GFZ und wurde 2016 an der TU Wien zum Thema „Anwendung eines Kalman-Filters in der Auswertung von VLBI-Daten“ promoviert. Der Einsatz solcher Filter erhöht die Messgenauigkeit geodätischer Methoden und ermöglicht so beispielsweise verbesserte Aussagen zur Änderungen des Meeresspiegels. ■

Michelson-Preis für Robert Emberson



Robert Emberson bei der Probenahme im Gelände (Foto: N. Hovius, GFZ)

Der ehemalige Doktorand der GFZ-Sektion Geomorphologie, **Robert Emberson**, wurde am 22. Juni 2017 an der Universität Potsdam mit dem Michelson-Preis für die beste mathematisch-naturwissenschaftliche Promotion des akademischen Jahres 2016/2017 ausgezeichnet. Robert Emberson schloss seine Dissertation „Chemische Verwitterung gesteuert durch Hangrutschungen“ mit summa cum laude ab. Der Michelson-Preis wird seit 2009 von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam für die

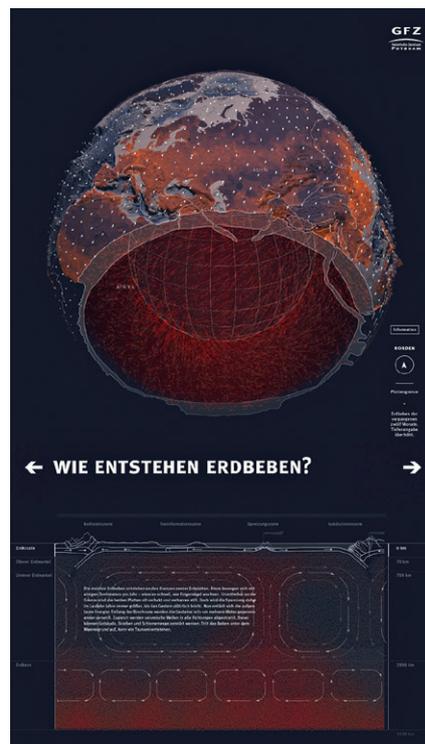
beste Promotion des akademischen Jahres verliehen. Dieses Jahr erhielten gleich zwei Doktoranden den mit 1500 Euro dotierten Preis, der deshalb geteilt wird. Prof. Niels Hovius, Leiter der GFZ-Sektion Geomorphologie und Betreuer von Robert Emberson, nahm den Preis stellvertretend entgegen. ■

Juliane Dannberg erhält Preis für Wissenschaftskommunikation

Dr. Juliane Dannberg, ehemals GFZ-Sektion Geodynamische Modellierung, wurde am 5. Oktober 2017 in Heidelberg der „Klar-Text – Preis für Wissenschaftskommunikation“ verliehen. Sie überzeugte die Jury mit einem Text über Gesteinsbewegungen im Inneren der Erde, der neugierig machen soll auf das, was in der Forschung passiert. Neben ihr wurden sechs weitere Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler ausgezeichnet. Die Gewinnerinnen und Gewinner erhalten ein Preisgeld von 5000 Euro. Der Preis wurde bereits zum 15. Mal verliehen – bis zum vergangenen Jahr unter dem Titel „Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft“. Juliane Dannberg hat in der Kategorie Physik teilgenommen. Sie hat 2016 ihre Promotion in der GFZ-Sektion Geodynamische Modellierung abgeschlossen und ist derzeit an der Colorado State University in Fort Collins, USA, wo sie über die Modellierung von Prozessen im Erdmantel forscht. ■

Erdbebenforschung zum Anfassen – Red Dot Award: Communication Design für GFZ-Projekt

Zusammen mit dem Science Communication Lab aus Kiel hat die Öffentlichkeitsarbeit des GFZ den Red Dot Award: Communication Design 2017 gewonnen. Der Preis wurde am 27. Oktober in Berlin verliehen. Ausgezeichnet wurde das interaktive Scientific Poster „Dynamic Planet“, das die Erdbebenforschung am GFZ in anschaulicher Form für ein breites Publikum zugänglich macht. Das interaktive Poster präsentiert auf einem berührungsempfindlichen überdimensionalen Monitor Erdbebeninformationen aus aller Welt in Echtzeit. Dazu werden Erdbebeninformationen aus aller Welt in Echtzeit. ■



Das interaktive Poster ist im Foyer des GFZ-Hauptgebäudes auf dem Telegrafenberg in Potsdam für Besucherinnen und Besucher zugänglich.

liefert, per Internetverbindung abgerufen und auf einem dreidimensionalen Globus dargestellt. Nutzerinnen und Nutzer können diesen Globus per Doppel-Touch-Funktion erkunden, indem sie ihn auf dem Bildschirm intuitiv drehen, vergrößern, verkleinern oder Informationen zu den einzelnen Beben aufrufen.

Neben der Präsentation der aktuellen Erdbebenaktivität können weitere Module zum Thema Erdbeben interaktiv erkundet werden. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den verschiedenen Forschungssektionen am GFZ haben für das Projekt Daten bereitgestellt und ihr Fachwissen eingebracht. ■

Video zum Poster: https://www.youtube.com/watch?v=p3yt7Mdx_N4

Weitere Informationen zum Poster: <http://www.scicom-lab.com/portfolio-items/dynamic-planet/>

Fünf neue Humboldt-Stipendiaten am GFZ

Fünf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler besuchen mit Stipendien der Alexander von Humboldt-Stiftung das GFZ.

Dr. Poulomi Ganguli geht in der Sektion Hydrologie der Frage nach, welchen Einfluss der Klimawandel auf das Risiko des gleichzeitigen Auftretens von Sturmfluten und Binnen-Hochwasserereignissen im Nordseeraum hat, den sogenannten „Compound flooding events“.

Dr. Robert Green ist zu Gast in der Sektion Seismologie und erforscht Prozesse unter vulkanisch aktiven Regionen und die Förder- und Speichermechanismen von Magma am Beispiel des Vulkans Kljutschewskoi auf der Halbinsel Kamtschatka in Russland.

Dr. Jessica Stanley, Gastforscherin in der GFZ-Sektion Erdoberflächenprozessmodellierung, untersucht die Prozesse bei großskaligen Hebungen im Kontinentinnern am Beispiel der Südafrikanischen Hochebene. Sie rekonstruiert die Erosionsgeschichte der Region, indem sie Landschaftmodellierungen mit der Thermochronologie, dem Sedimenttransport in marine Becken und Untersuchungen kosmogener Nuklide kombiniert.

Dr. Vasiliki Saltogianni, zu Gast in der GFZ-Sektion Dynamik der Lithosphäre, arbeitet an neuen Algorithmen, um Deformationen der Erdoberfläche an aktiven Plattengrenzen besser aufzeichnen und modellieren zu können. Aktuell untersucht sie den Zusammenhang zwischen Prozessen tief im Erdinneren und Erdbeben an Subduktionszonen.

Dr. Yosuke Yamazaki, zu Gast in der GFZ-Sektion Geomagnetismus, hat bislang in Japan, den USA und Großbritannien gearbeitet. Seine Forschung befasst sich mit der Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und dem Erdmagnetfeld. ■

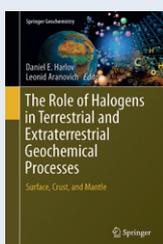


Alexander von Humboldt
Stiftung/Foundation

Bücher

The Role of Halogens in Terrestrial and Extraterrestrial Geochemical Processes: Surface, Crust, and Mantle

Harlov, D. E., Aranovich, L. (Eds.)
Springer Geochemistry, VI, 2018
1029 Seiten, ISBN 978-3-319-61665-0

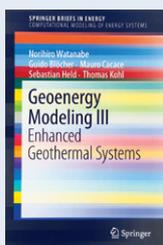


Über das Buch schreibt der Verlag:

The book summarizes the knowledge and experiences concerning the role of halogens during various geochemical processes, such as diagenesis, ore formation, magma evolution, metasomatism, mineralization, and metamorphism in the crust and mantle of the Earth. It comprises the role of halogens in other terrestrial worlds like volatile-rich asteroids, Mars, and the ice moons of Jupiter and Saturn. Review chapters outline and expand upon the basis of our current understanding regarding how halogens contribute to the geochemical/geophysical evolution and stability of terrestrial worlds overall. ■

Geoenergy Modeling III Enhanced Geothermal Systems

Watanabe, N., Blöcher G., Cacace, M., Held, S., Kohl, T. (Authors)
Springer Briefs in Energy, 2017, 104
Seiten, ISBN 978-3-319-46581-4



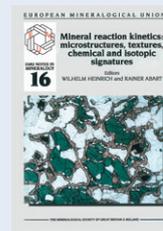
Über das Buch schreibt der Verlag:

This book focuses on numerical modeling of deep hydrothermal and petrothermal systems in fractured georeservoirs for utilization in Geothermal Energy applications. The authors explain the particular challenges and approaches

to modeling heat transport and high-throughput flow in multiply fractured porous rock formations. In order to help readers gain a system-level understanding of the necessary analysis, the authors include detailed examples of growing complexity as the techniques explained in the text are introduced. The coverage culminates with the fully-coupled analysis of real deep geothermal test-sites located in Germany and France. ■

Mineral reaction kinetics: Microstructures, textures, chemical and isotopic signatures

Heinrich, W., Abart, R. (Eds.)
Mineralogical Society, EMU Notes in Mineralogy, 16, 2017, 668 Seiten
ISBN: 978-0903056-63-2



Über das Buch schreiben die Herausgeber:

In the late 20th century advances in experimentation and in material characterization greatly fostered the development of internally consistent thermodynamic data. Together with the development of thermodynamic modelling tools this enhanced our ability to analyse phase equilibria in rocks and to obtain accurate quantitative information on the conditions of magmatic and metamorphic crystallization. This gave an unprecedented boost to mineralogy, petrology and geochemistry and helped illuminate long-standing questions in geodynamics as well as in geo- and cosmochemistry. Attainment of thermodynamic equilibrium among the phases constituting a rock and metastable preservation of equilibrium phase relations, which are indispensable pre-requisites for application of equilibrium thermodynamics, could be demonstrated or, in many cases, were tacitly assumed. ■

System Erde. GFZ-Journal (2017) Jahrgang 7, Heft 2
systemerde.gfz-potsdam.de

Nützliche neue Begleiter am Himmel

Satelliten als Erdbeobachtungsinstrumente haben eine lange Tradition auf dem Potsdamer Telegrafenberg

Josef Zens, Frank Flechtner, Jens Wickert, Christoph Förste, Claudia Stolle, Ludwig Grunwaldt, Johannes Leicht, Dietlinde Friedrich, Sibylle Itzerott 6-11

Beobachtung von Massentransporten im System Erde mit GRACE und GRACE-FO

Frank Flechtner, Christoph Dahle, Ludwig Grunwaldt 12-17

Ozeanographische Anwendungen der GRACE-Mission

Henryk Dobslaw, Saskia Esselborn, Maik Thomas 18-23

Erdbeobachtung mit Navigationssatelliten

Jens Wickert, Galina Dick, Maorong Ge, Torsten Schmidt, Maximilian Semmling, Fadwa Alshawaf, Christina Arras, Milad Asgarimehr, Andrey Babeyko, Zhiguo Deng, Stefan Heise, Jürgen Klotz, Xingxing Li, Cuixian Lu, Benjamin Männel, Markus Ramatschi, Tzvetan Simeonov, Sibylle Vey, Florian Zus, Harald Schuh 24-31

Geomagnetismus und Partikelstrahlung im Weltraum

Claudia Stolle, Yuri Shprits, Jan Saynisch, Foteini Vervelidou, Jürgen Matzka 32-37

Satellitenfernerkundung von Landoberflächen – Beginn einer neuen Ära

Daniel Spengler, Robert Behling, Sabine Chabrillat, Hannes Diedrich, Doris Dransch, Saskia Förster, Mahmud H. Haghghi, André Hollstein, Sibylle Itzerott, Theres Kuester, Christian Mielke, Robert Milewski, Mahdi Motagh, Sigrid Roessner, Daniel Scheffler, Mike Sips, Karl Segl, Alexandra Wolanin, Luis Guanter 38-49

