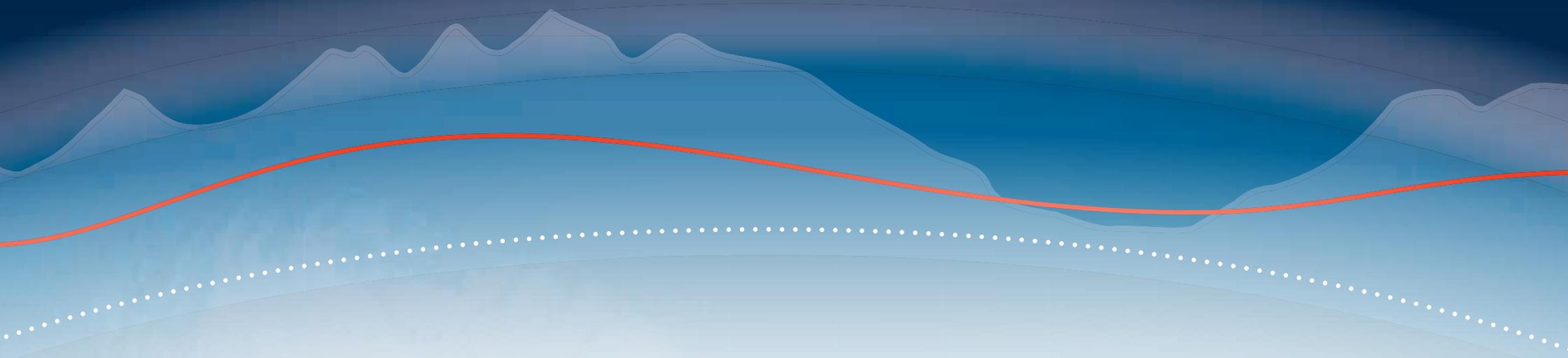




GOCE

Neues Weltbild aus der Schwerkraft

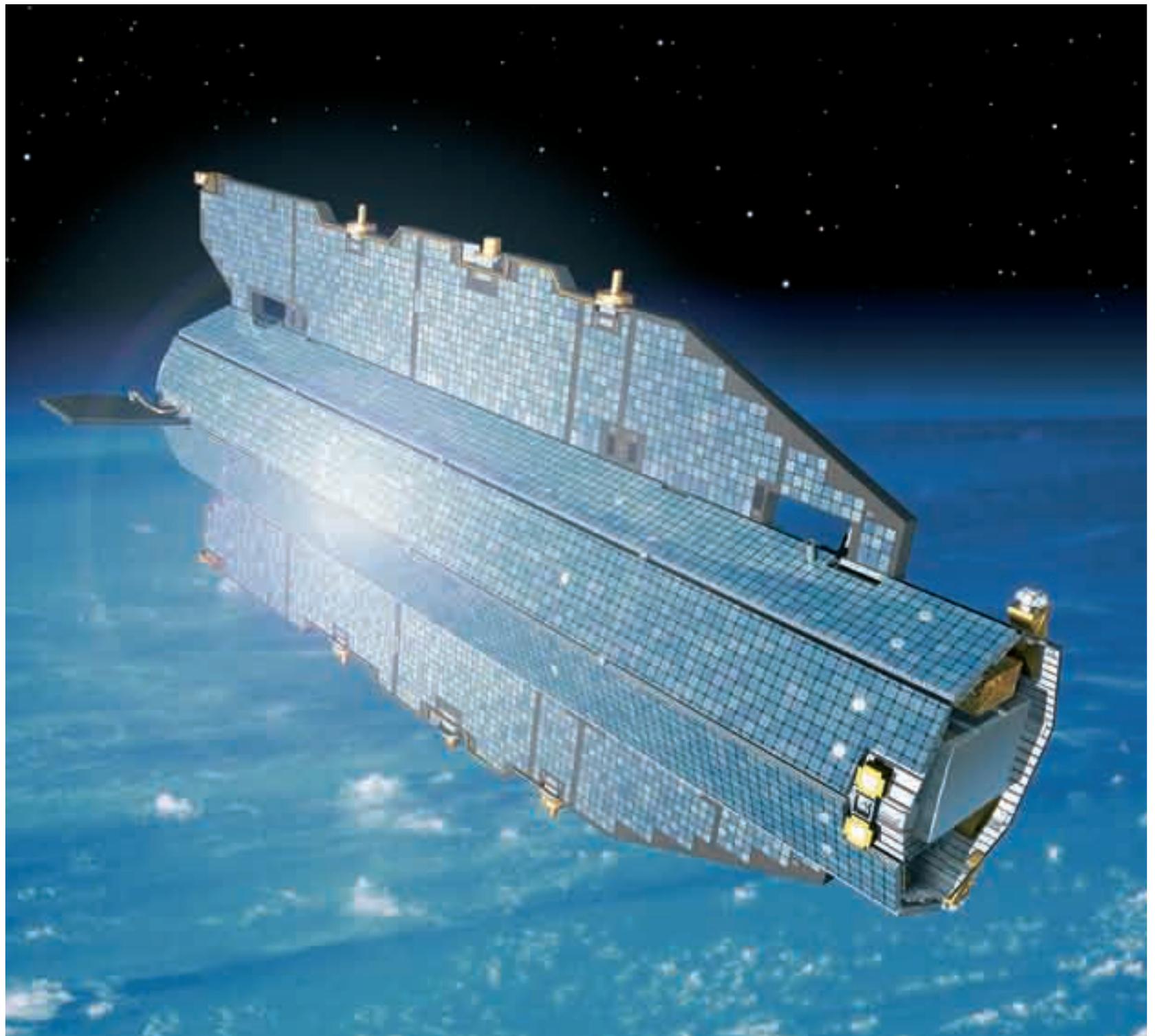


GOCE projektbüro
deutschland



Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Technische Universität München

Im Orbit zeigt immer dieselbe Seite des Satelliten in die Sonne. Die Solarzellen, die an Rumpf und Flügel angebracht sind, müssen extremen Temperaturschwankungen von 160 Grad bis minus 170 Grad standhalten.
ESA



SEITE 4	↓ Die GOCE Mission
SEITE 6	↓ Für's Feine: Das Gradiometer als Herzstück
SEITE 8	↓ Für's Grobe: Das Satellite-to-Satellite-Tracking Instrument
SEITE 9	↓ Richtungsweisend: Die Magnetic Torquers
SEITE 9	↓ „Cruise Control“ auf höchstem Niveau: Das Ionentriebwerk
SEITE 10	↓ „Normal-Null“ und seine Abweichungen – die GOCE-Produkte
SEITE 13	↓ Worldwide Net: Ein globales Höhensystem
SEITE 15	↓ Einblick ins unbekante Erdinnere
SEITE 17	↓ Ein Kommen und Gehen: Das Gleichgewicht der Eismassen
SEITE 20	↓ Fragiles Gleichgewicht: die Ozeanzirkulation
SEITE 22	↓ Hier fließt alles zusammen: Der Meeresspiegel
SEITE 26	↓ Chancen und Herausforderungen für GOCE
SEITE 29	↓ Arbeit des Projektbüros
SEITE 30	↓ Impressum

INHALTSVERZEICHNIS



Venus, ESA



Bereit für den großen Sonnensimulator. Bei ESTEC/NL wird der GOCE-Satellit extremen Temperaturen ausgesetzt, um die Bedingungen im Weltall zu simulieren. ESA



Das Geoid stellt die Abweichungen vom Erdellipsoid dar. Obwohl es „Höhen“ und „Senken“ hat, ist seine Oberfläche eine Äquipotentialfläche. ESA

GOCE: DIE MISSION

“... the gravity field over land areas on Earth is less well known than is that of Venus.”

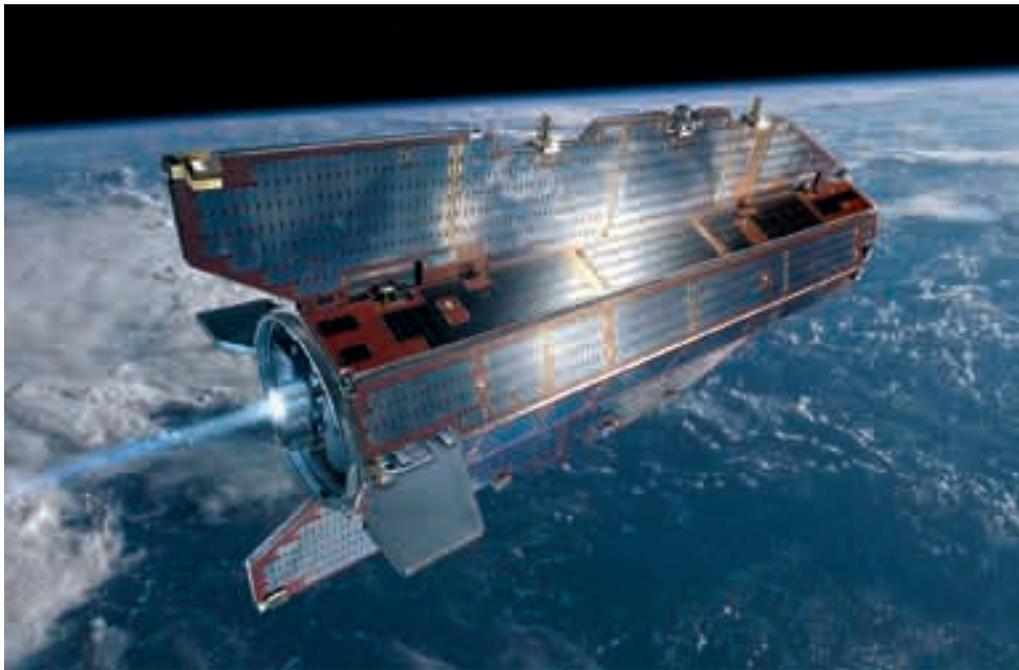
(Dan McKenzie, 1995)



DIE SCHWERKRAFT IST auf der Erde nicht überall gleich groß: An den Polen ist man aufgrund der Abplattung dem Erdmittelpunkt zirka 20 km näher als am Äquator, entsprechend höher ist dort die Erdbeschleunigung. Außerdem vermindert am Äquator die Fliehkraft, also die Rotation der Erde, die Schwerkraft. Zusätzlich haben die Struktur der Erdoberfläche und die inhomogene Massenverteilung im Erdinnern Einfluss auf das Gravitationsfeld.

EIN GLOBALES OZEANMODELL, das in die Berechnung von Klimamodellen eingeht, verlangt ein ebenfalls globales Feld von grundlegenden Parametern, wie Temperatur, Salzgehalt oder Meerestopographie. Will man die Meerestopographie ermitteln, muss man das globale Schwerefeld kennen. Da es sich hierbei um sehr komplexe Modelle handelt, spielen Genauigkeit und Auflösung dieser Parameter die entscheidende Rolle.

NUR MIT EINER Satellitenmission lässt sich das Erdschwerefeld global mit ausreichender Genauigkeit und räumlicher Auflösung erfassen. Schweredaten, die auf der Erdoberfläche ermittelt wurden, sind lückenhaft und für viele Anwendungen zu uneinheitlich im Hinblick auf die globale Überdeckung und die Genauigkeit der Daten. Als erster Satellit wird GOCE das Gravitationsfeld der Erde mit Hilfe zweier Methoden bestimmen: Zum einen fungiert der Satellit selber als Probemasse im Erdschwerefeld. Seine Bahn wird mit Hilfe von GPS bestimmt. So kann man die großräumigeren Strukturen des Gravitationsfeldes herleiten. Die sehr genaue Auflösung von kleinskaligen Strukturen übernimmt das Gravitationsgradiometer.



ESA-AOES-Medialab

DIE BISHERIGEN SATELLITEN-SCHWEREFELD-MISSIONEN

CHAMP und vor allem GRACE haben die zeitlichen Veränderungen des Gravitationsfeldes im Auge. GOCE hingegen wird eine Momentaufnahme liefern, diese aber in einer bisher unerreichten Detailgenauigkeit. So wird es zukünftig möglich sein, ein „mittleres Schwerefelds“ auszurechnen, das eine unerlässliche Nebenbedingung für viele Modellierungsansätze in den Geowissenschaften darstellt.

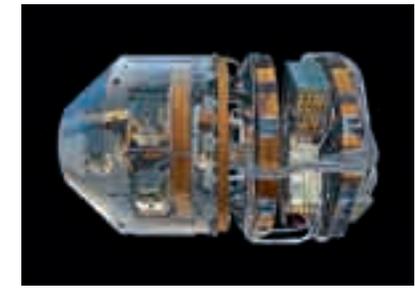
MIT GOCE – dies steht für Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer - wird die erste Kernmission des Programms „Living Planet“ der European Space Agency (ESA) gestartet. Dieses europäische Erdbeobachtungsprogramm soll den Erdwissenschaftlichen Daten liefern, um Prozesse im System Erde zu studieren und vor allem klimarelevante Effekte genauer vorhersagen zu können.

GRÖSSTE TECHNOLOGISCHE HERAUSFORDERUNG der Mission ist das Gravitationsgradiometer, das erstmals in der Raumfahrt erprobt wird. Das hochempfindliche Messinstrument verlangt einen sehr hohen Grad an mechanischer und thermischer Stabilität; Massenveränderungen oder -verlagerungen im Satelliten würden die Messdaten unbrauchbar machen. Die ESA nennt GOCE daher auch ihre „leiseste Mission“. Auf alle beweglichen Teile, wie Sonnensegel, wurde verzichtet, wichtige Bereiche des Satelliten wurden aus Kohlenstofffasern gefertigt, einem Material, das sich durch einen sehr kleinen, negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten auszeichnet.

GOCE – DER WELTRAUM-FERRARI

- Startdatum:**
10. September 2008
- Trägerrakete:**
Rokot-Rakete von Eurockot Launch Services GmbH
- Startort:**
Kosmodrom Plesetsk, Russland
- Flight Operations:**
Flugüberwachung durch das European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt
- Bodenstation:**
Datendownload durch die Kiruna Bodenstation, Schweden
- Datenprozessierung und Archivierung:**
Earth Observation headquarter der ESA (ESRIN) in Italien
- Nominale Lebensdauer:**
20 Monate
- Bahnhöhe:**
270 km
- Dauer einer Erdumrundung:**
zirka 90 Minuten
- Umlaufbahn:**
Sonnensynchrone
- Neigung:**
96,5°
- Gewicht:**
1100 kg
- Größe:**
5 × 1 m
- Menge an Xenontreibstoff an Bord:**
40 Liter
- Räumliche Auflösung des Erdschwerefelds:**
100 km
- Geoid-Genauigkeit:**
1 – 2 cm

VOR DIESEM HINTERGRUND ist auch die angestrebte Flughöhe von nur 270 km eine Vorgabe, die besondere Anpassungen am Satelliten erfordert. Denn in dieser Höhe macht sich die Restatmosphäre der Erde schon stark bemerkbar; die Reibungskraft, die auf den Satelliten wirkt, muss kontinuierlich kompensiert werden. ■

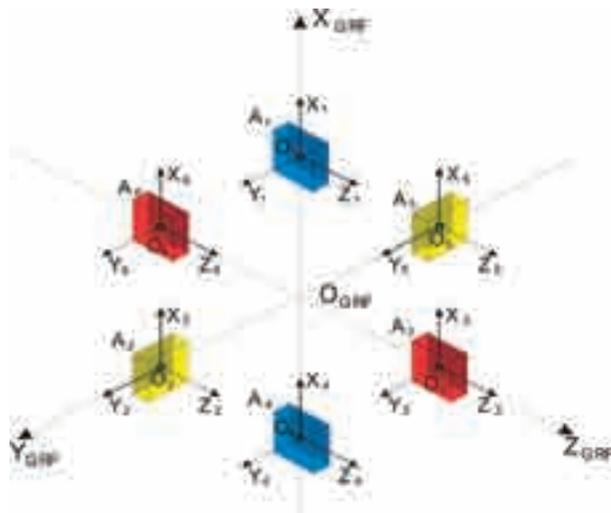


1. das Akzelerometer in seinen Einzelbestandteilen,
2. ein Gradiometerarm mit 2 Akzelerometern,
3. die montierten Gradiometerarme,
4. das fertige Gravitationsgradiometer ESA

FÜR'S FEINE: DAS GRAVITATIONSGRADIOMETER ALS HERZSTÜCK VON GOCE

SEITE

6



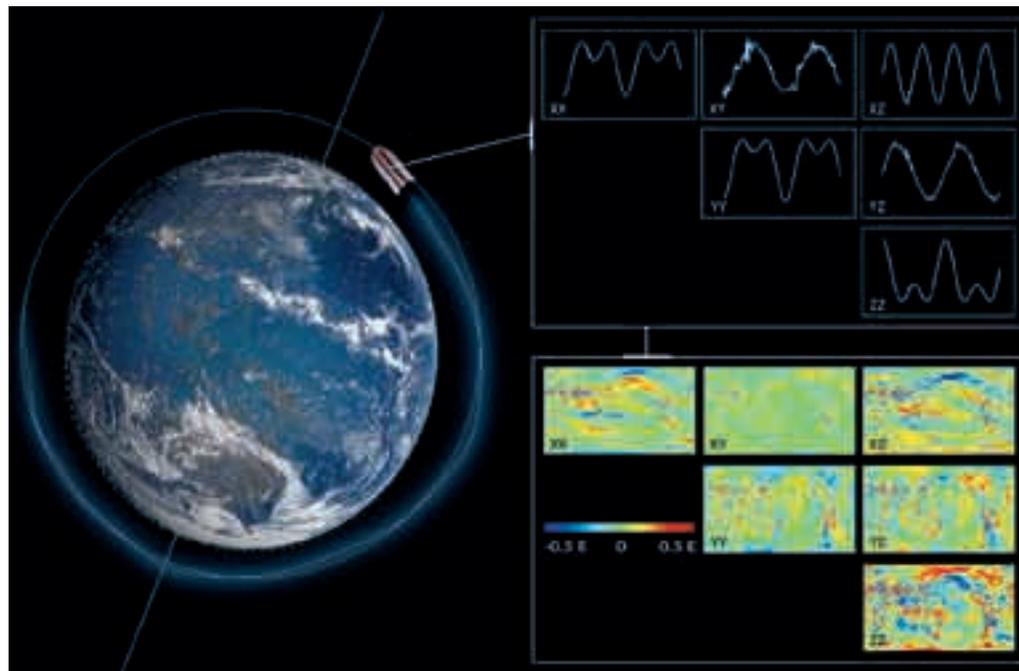
Akzelerometer- und Gradiometer-Referenzrahmen (ARF, GRF): Jedes Akzelerometer hat eine weniger sensible Achse (dargestellt durch die gestrichelten Linien), um die Funktionsfähigkeit auf der Erde testen zu können.



UM DIE GRAVITATIONSGRADIENTEN in allen Raumrichtungen genauestens zu erfassen, wurde für GOCE ein 3-achsiges elektrostatisches Gravitationsgradiometer entwickelt. Auf jeder Gradiometerachse sitzen zwei Akzelerometer im Abstand von 50 Zentimetern. Die hochempfindlichen Aggregate können Beschleunigungen erfassen, die nur 10^{-13} g, also einen unvorstellbar kleinen Bruchteil der auf der Erde gemessenen Schwerkraft, betragen. Damit messen diese Akzelerometer 100 Mal genauer als alle vorher im Weltraum verwendeten. Die drei Arme des Gradiometers sind orthogonal zueinander angeordnet: Einer zeigt in Richtung der Flugbahn des Satelliten (x-Achse), der andere steht senkrecht dazu (y-Achse). Der dritte zeigt in etwa vom Erdmittelpunkt weg (z-Achse). Aufgabe der drei Akzelerometerpaare ist es, die Variationen in der Erdanziehungskraft zu bestimmen, die auf die Probmassen in jedem Akzelerometer beim Umkreisen der Erde ausgeübt wird.

DAS MESSPRINZIP DER Akzelerometer beruht auf der Erfassung der elektrostatischen Kräfte, die notwendig sind, die Probmasse schwebend im Zentrum des speziell angefertigten Käfigs zu halten. Die servogesteuerte Aufhängung der Prüfmasse erfasst deren lineare – und Rotationsbewegung. Die Probmasse selber ist ein 320g schwerer Platin-Rhodium-Quader mit einer Kantenlänge von 4x4x1cm. Sie ist umgeben von einem Käfig aus Ultra-Low-Expansion (ULE)-Keramik, der mit Goldelektroden bedampft ist. Paarweise dienen diese als Kondensatoren, die die Bewegung des Probekörpers erfassen. Gleichzeitig erzeugen sie das elektrische Feld, das die Probmasse schwebend hält. Diese ist mit einem 25 mm langen und $5\ \mu\text{m}$ „dicken“ Golddraht kontaktiert.

Mit dem GOCE-Gradiometer werden gleichzeitig sechs unabhängige aber komplementäre Komponenten des Schwerefeldes erfasst.
 Vorlage: ESA-AOES Medialab

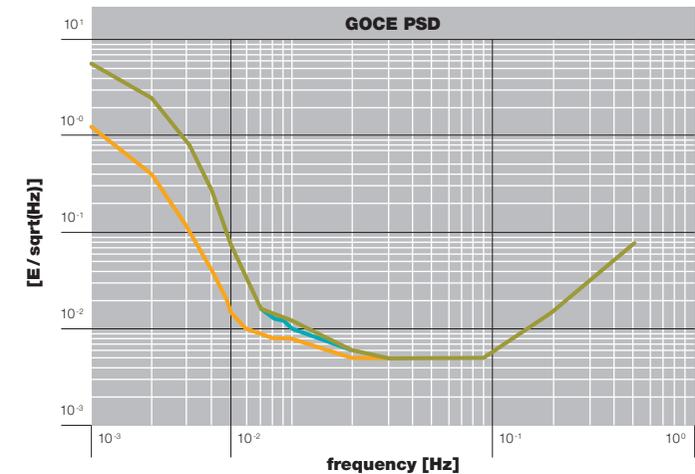


WEGEN IHRER UNTERSCHIEDLICHEN

Lage im Erdschwerefeld spüren die zwei Probemassen, die auf einem Gravimeterarm im festen Abstand gehalten werden, die Anziehungskraft der Erde leicht unterschiedlich. Subtrahiert man die jeweiligen Messwerte, kann man auf den Gradienten der Erdbeschleunigung schließen, kombiniert man die drei Beschleunigungsunterschiede auf den drei orthogonalen Achsen, lassen sich damit alle Komponenten des Gravitationsgradiententensors bestimmen. Als Ergebnis einer Messphase erhält man für jede Komponente eine gleichmäßige und detaillierte Karte der Schwerkraftgradienten unserer Erde. Die Summe der gemessenen Beschleunigungen einer Gradiometerachse dagegen stellt die Störbeschleunigung in Richtung der Gradiometerachse dar. Das Gravitationsgradiometer ist somit auch Hauptsensor im Orbitkontrollsystem (DFAC).

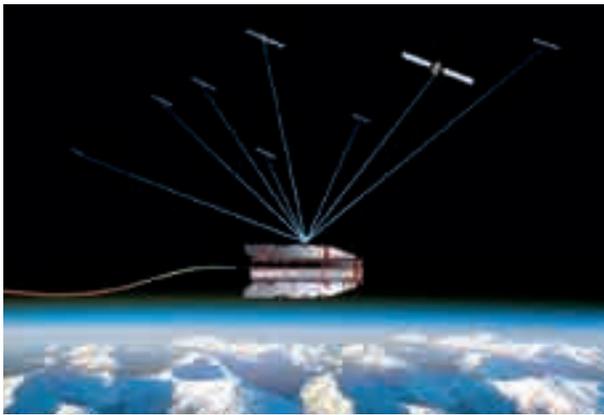
WÄHREND DER MESSPHASEN

müssen die Gradiometerarme völlig unbeweglich gehalten werden. Höchste Genauigkeit und eine äußerst stabile Positionierung der Akzelerometer sind daher die größten Herausforderungen bei der Konstruktion. Für die Gradiometerarme wurde ein Material entwickelt, das vor allem aus wabenartigen Kohlenstoffasern besteht. Es zeichnet sich durch eine hohe mechanische Stabilität und einen sehr kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten aus.



Spektrale Fehleranalyse des Gradiometers:
 Die erwartete Genauigkeit der Tensorkomponenten.

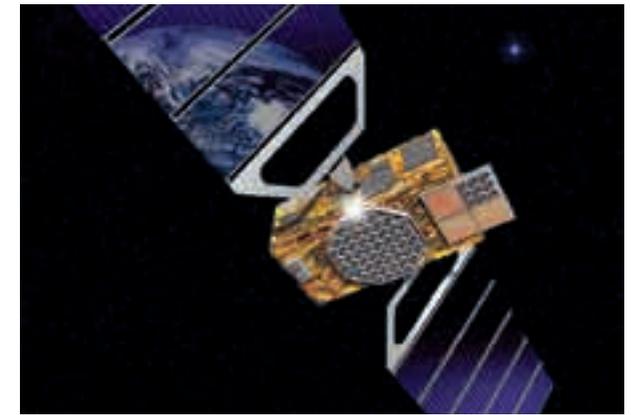
— V_{xx}
 — V_{yy}
 — V_{zz}



Das Prinzip des high/low-Satellite-to-satellite tracking, ESA



Helix-L-Band-Antenne des GPS-Empfängers, ESA



Galileo-Satellit, ESA

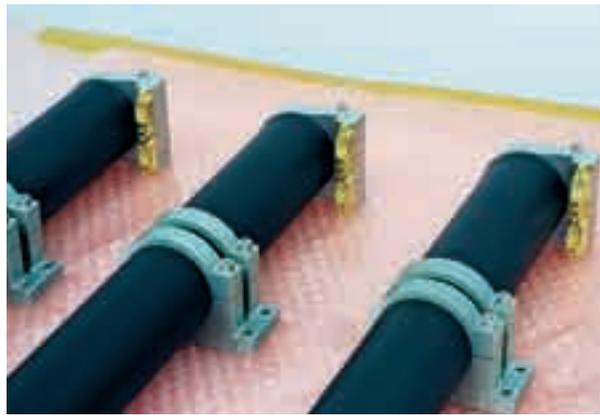
FÜR'S GROBE: DAS „SATELLITE-TO-SATELLITE TRACKING“- INSTRUMENT (SSTI)



WILL MAN DAS Gravitationsfeld der Erde in seiner Gesamtheit erfassen, reicht das Gravitationsgradiometer allein nicht aus. Nur kleinskalige Strukturen kann es sehr genau auflösen. Um Schwereanomalien von größerer geographischer Ausdehnung zu erfassen, benötigt man eine weitere Messmethode.

WÄRE DIE ERDE eine Kugel aus gleichartigen, konzentrischen Schichten, so beschriebe eine Probemasse, die die Erde auf Satellitenhöhe umkreist, eine elliptische Bahn mit der Erde als Fokelpunkt. Die Erde ist jedoch nicht so homogen. Eine Probemasse im Erdschwerefeld führt daher eine Oszillationsbewegung aus, die diese dominanten Bahn überlagert – gleichsam ein Gravitationscode. Erfasst man diese Bewegung, können die Raumkomponenten der Erdbeschleunigung bestimmt werden. In diesem Sinne ist GOCE eine Probemasse; aus der sehr genauen Bestimmung seiner Bahn kann auf den Erdbeschleunigungsvektor geschlossen werden. Damit er erfasst werden kann, wurde der Satellit mit einem GPS-Empfänger ausgestattet. Während er auf seinem Orbit in einer Flughöhe von 270 Kilometern kreist, bestimmt er bezogen auf die GPS-Satelliten hoch über ihm in 20.000 km Flughöhe seine Position. Dieses Verfahren nennt man „high/low satellite-to-satellite-tracking“ (SST).

DAS SST-INSTRUMENT (SSTI) besteht aus einem 12-Kanal GPS-Empfänger und zwei Helix-L-Band-Antennen. Signale von bis zu 12 GPS-Satelliten kann der Empfänger simultan aufnehmen. Das SSTI liefert mit einer Frequenz von 1Hz Entfernungs- und Phasenmessungen auf beiden GPS-Frequenzen (L1 und L2) sowie eine Lösung des Navigationsproblems in Echtzeit. Die Information der momentanen Bahndaten benötigt man, um den Satelliten auf Kurs zu halten und die Gradiometerdaten einer ersten Prüfung zu unterziehen. ■



Magnetic Torquers, ESA



Ionentriebwerk, ESA

RICHTUNGSWEISEND: DIE MAGNETIC TORQUERS

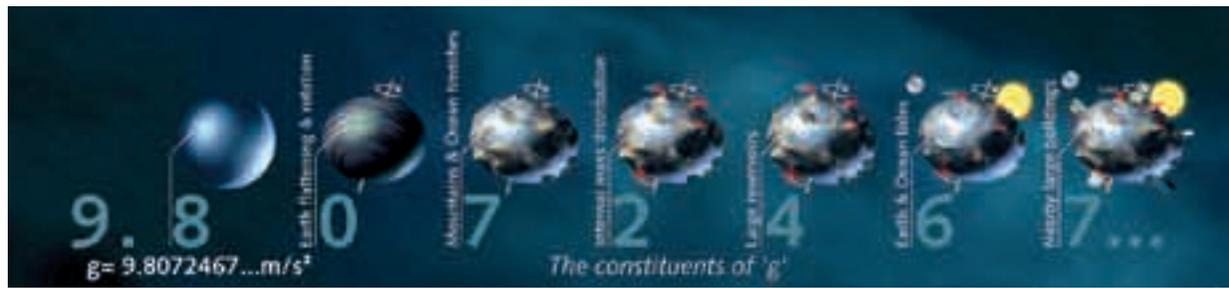


BEI GOCE KOMMEN drei Magnetic Torquers zum Einsatz, die orthogonal zueinander stehen und entlang der x-, y- und z-Achse des Satelliten ausgerichtet sind. Sie bestimmen die Flugrichtung des GOCE Satelliten, indem sie ein großes magnetisches Dipolmoment erzeugen. Dabei machen sie sich die physikalische Eigenschaft zunutze, dass sich ein magnetischer Dipol immer parallel zu den magnetischen Feldlinien ausrichten will. Äußeres Feld ist natürlich das Erdmagnetfeld, dessen momentane Richtung und Betrag mit Hilfe der Magnetometer bestimmt wird. Hauptkomponenten des Magnetic Torquer sind der Kern aus einem magnetisch weichem Material mit geringer Restmagnetisierung und die Wicklungen einer oder mehrerer Spulen um diesen Kern. ■



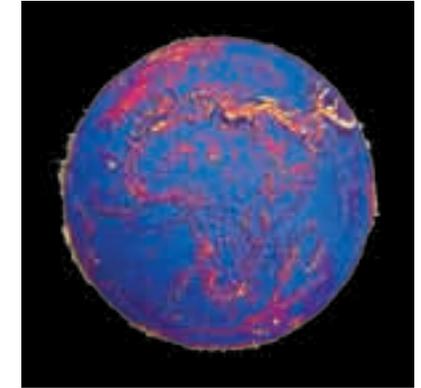
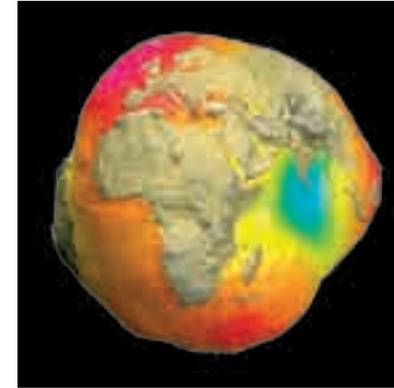
EIN IONENTRIEBWERK FUNKTIONIERT auf Basis der Impulserhaltung: Der Rückstoß eines neutralisierten Ionenstrahls wird für den Antrieb genutzt. In den Messphasen soll es die Reibungskräfte, die auf den Satelliten wirken, kompensieren und so in Flugrichtung den freien Fall gewährleisten. Außerdem muss der Rückstoß so stark sein, dass der Satellit in der Winterpause in eine höhere Umlaufbahn gehoben werden kann. Aus Redundanzgründen sind zwei Ionentriebwerke vorhanden. Befestigt sind sie am hinteren Ende des Satelliten und auf Halterungen montiert, deren Ausrichtung so justiert werden kann, dass der Schub direkt auf den Massenschwerpunkt des Satelliten übertragen wird. ■

„CRUISE CONTROL“ AUF HÖCHSTEM NIVEAU: DIE IONENTRIEBWERKE



Erdbeschleunigung unter der Lupe:
Die Bestandteile von g

1. Stelle nach dem Komma: **Kugelgestalt**
2. Stelle nach dem Komma: **Erdabplattung und Rotation**
3. Stelle nach dem Komma: **Gebirge und Ozeangraben**
4. Stelle nach dem Komma: **Massenverteilung**
5. Stelle nach dem Komma: **große Ressourcenspeicher**
6. Stelle nach dem Komma: **Gezeiten der Ozean und der Erde**
7. Stelle nach dem Komma: **Große Gebäude in der Nähe des Messpunkts**



Die GOCE-Produkte: Geoid (links) und Schwerefeldanomalien (rechts), GFZ Potsdam

„NORMAL - NULL“ UND SEINE ABWEICHUNGEN - DIE GOCE PRODUKTE

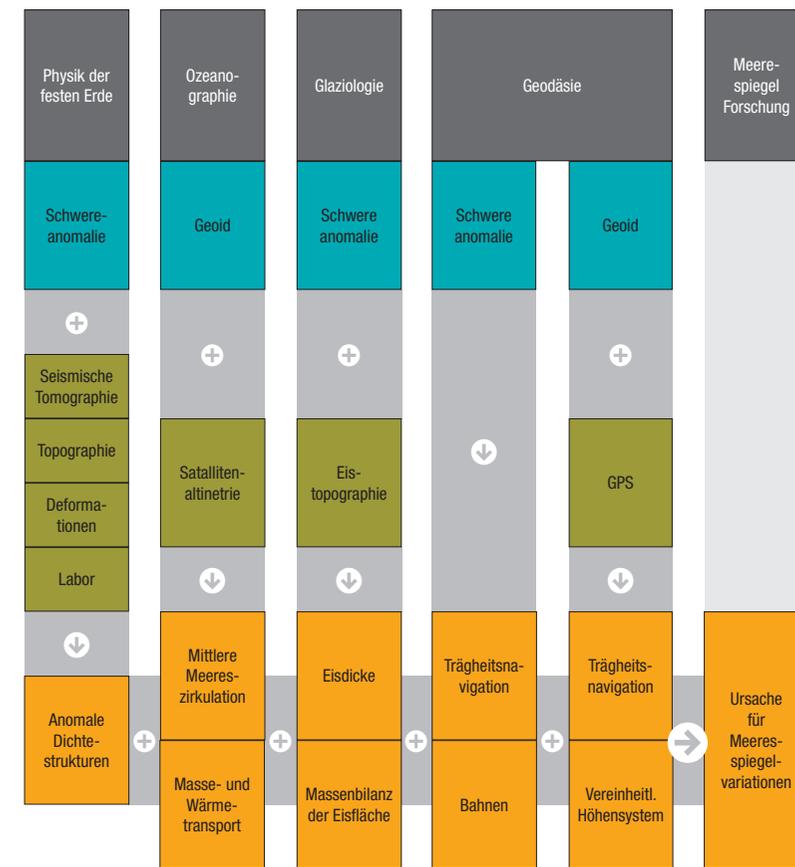


GOCE-PRODUKTE SIND DIE globale Darstellung der Schwereanomalien mit einer Genauigkeit von 1 mGal (1 Millionstel von g) und des Geoids mit einer Präzision von ein bis zwei Zentimetern bei einer räumlichen Auflösung von 100 km.

DAS SCHWEREFELD DER Erde entspricht in guter Näherung dem einer Kugel und führt zu der bekannten Erdbeschleunigung von $g=9,8 \text{ m/s}^2$. Doch g ist nicht so konstant, wie man gemeinhin annimmt. Schaut man genauer hin, wirkt sich in der zweiten Stelle nach dem Komma die Abplattung durch die Rotation der Erde aus. Mit „g“ auf zwei Nachkommastellen ist das Schwerefeld schon zu 99,9 Prozent erfasst, die Einflüsse der ungleichen Verteilung von Wasser und Land, unterschiedliche innere Massenverteilungen und die Gezeiteneinflüsse von Erde und Sonne sind viel kleiner.

WILL MAN DIESE Schwankungen im Schwerefeld isoliert betrachten, wird ein ellipsoidisches Näherungs- oder Normalschwerefeld „herausgerechnet“, das die Anteile der Kugelgestalt der Erde, die Abplattung im Schwerefeld und die Zentrifugalbeschleunigung umfasst. Übrig bleibt die Struktur des Restfeldes, die Schwerefeldanomalie, die GOCE mit einer Genauigkeit von 1 mGal darstellen kann, was einem Millionstel „g“ entspricht. In dieser Genauigkeit können Strukturen mit einer Ausdehnung von 100 km aufgelöst werden.

DAS ZWEITE GOCE-PRODUKT, das Geoid ist eine Niveaufläche, d.h. eine Fläche auf der die Schwerkraft an jedem Ort senkrecht wirkt und das Schwerepotential konstant ist. Aus der unendlichen Anzahl von Flächen gleichen Potentials wird diejenige herausgegriffen, die im Mittel das Meeresniveau, also das bekannte „Normal Null“ repräsentiert. Somit ist das Geoid die gedachte Oberfläche eines Ozeans, der sich im hydrostatischen Gleichgewicht befindet, also weder Wellen noch Strömungen aufweist. GOCE wird das Geoid mit einer Genauigkeit von 1 - 2 cm bei einer räumlichen Auflösung von 100 km darstellen. Das neue, sehr genaue Schwerefeld- und Geoidmodell wird in verschiedenen Bereichen der Geowissenschaften genutzt werden. Die Physik der festen Erde erhofft sich Aufschluss über Massenverteilungen im Erdinneren, in der Geodäsie ist das wichtigste Ziel ein einheitliches Höhensystem, für die Glaziologie rückt eine großflächige Eisdickenmessung in greifbare Nähe. Das Hauptanwendungsgebiet von GOCE wird jedoch die Ozeanographie sein: Durch ein genaueres Geoid wird sich die Ozeanzirkulationen vom Welt- raum aus besser erfassen lassen. Aus den neueren Modellen der Ozeanographen, Glaziologen und Geodäten können dann Schlussfolgerungen über die Ursachen von Meeresspiegelvariationen gezogen werden.



Die Anwendungsgebiete von GOCE (grau), welche Daten sie aus der GOCE Mission ziehen (blau), welche Daten zusätzlich benötigt werden (grün), für welche Gebiete man neue Erkenntnisse erwartet (orange)

NATÜRLICH BRINGEN NICHT die Schwerefelddaten allein einen Fortschritt auf den genannten Gebieten. Es ist eine Kombination der Schwerefelddaten mit anderen Messdaten nötig. Die Abbildung zeigt welche Datenkombination für die genannten Forschungsbereiche relevant ist und welche Forschungsergebnisse man sich dadurch erhofft.

DER GOCE-SATELLIT WURDE entwickelt, um zu einer „einmaligen“, globalen und statischen Aufnahme des Erdschwerefeldes bzw. des Geoids in bislang unerreichter Genauigkeit und Auflösung zu gelangen. Dazu müssen die reinen Messdaten (= Level 0) drei Bearbeitungsstufen durchlaufen.

ESA

Vom Satelliten zum Nutzer:

Von der Bodenstation Kiruna aus werden Kommandos mit dem Satelliten ausgetauscht und Daten heruntergeladen. Überwacht wird die Mission durch ESOC in Darmstadt. Level 0 und Level 1b Daten werden im Payload Data Ground Segment generiert und zur Verfügung gestellt; die High Level Processing Facility (HPF), eine dezentrale Einheit, die durch das Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der TU München koordiniert wird, erarbeitet die Level 2-Produkte. Der Nutzer erhält seine Daten vom ESA-Zentrum ESRIN.

SEITE 11

BEI DER LÖSUNG für die Schwerefeldmodellierung handelt es sich um eine Kombination von Daten des high-low satellite-to-satellite tracking (SST) mittels GPS- und Daten des Gravitationsgradiometers mit Unterstützung der Sternensensoren. Man nutzt dabei die höhere Genauigkeit des „satellite-to-satellite-tracking“ für die Modellierung des großskaligen Schwerefeldes und kombiniert sie mit den Gradiometerdaten, die die räumlichen Details liefern.

GOCE UMKREIST DIE Erde mit einer Bahnneigung von 96,5°. Deswegen werden über den Polkappen keine Daten erfasst. Diese sogenannten „Polarlöcher“ müssen durch Boden- oder Fluggravimeterdaten aufgefüllt werden. GOCE-Messdaten enthalten auch zeitabhängige Schwerefeldvariationen, wie die Gezeiten, die herausgefiltert werden müssen. Neben Modellannahmen verwendet man dazu Daten, die durch die Schwerefeldmission GRACE gewonnen wurden.

LEVEL 0	LEVEL 1B	LEVEL 2	LEVEL 3
Zeitgeordnete Rohdaten, wie sie von GOCE gemessen werden. Der Satellit gibt die Daten an die Bodenstation weiter.	Zeitfolgen kalibrierter und korrigierter Instrumentendaten entlang der Umlaufbahn. Diese Daten beinhalten die primären Instrumentendaten wie Gravitationsgradienten, SST-Beobachtungen und die Satellitenposition sowie zusätzliche Daten wie die Linear- und Winkelbeschleunigung des Satelliten.	<ul style="list-style-type: none"> Die High Level Processing Facility erstellt fünf Produkte. Zwei Produkte sind Gravitationsgradienten in zwei unterschiedlichen Referenzsystemen, eine präzise Orbitlösung aus den GPS Daten und eine Lösung für das GOCE-Schwerefeldmodell und Geoid und Schwereanomalie mit der zugehörigen Varianz-Kovarianz Matrix. Genauer über die Level 2 Produkte kann dem GOCE Level 2 Product Data Handbook entnommen werden. (link:http://esamultimedia.esa.int/docs/Level_2_Product_Data_Handbook.pdf) Die Definition verwendeter Koordinatensysteme und des Rotationsellipsoids findet man in den GOCE-Standards. (Link: http://esamultimedia.esa.int/docs/GOCE_Standards_Document.pdf) 	Abgeleitete Nutzerdaten, die für Anwendungen in den Bereichen Physik der festen Erde, Geodäsie, Meeresspiegel, Ozeanzirkulation verwendet werden und die außerdem zusätzlich Daten aus Fluggravimetrie, In-Situ-messungen oder von anderen Satelliten benötigen.

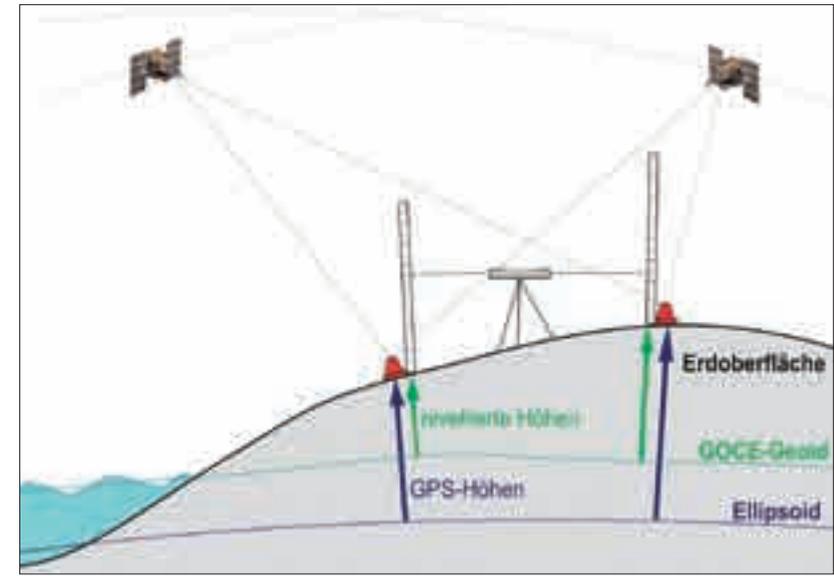
LEVEL 2 PRODUKTE
EGG_NOM_2 <ul style="list-style-type: none"> Extern kalibrierte und korrigierte Gravitationsgradienten im Koordinaten des Gravimeters mit den dazugehörigen Korrekturen für externe Kalibrierung und den zeitabhängigen Variationen des Gravitationsfeldes (Gezeiten, atmosphärische und ozeanische Massenvariationen) Markierung von Ausreißern und aufgefüllten Datenlücken Statistische Information
EGG_TRF_2 <ul style="list-style-type: none"> Extern kalibrierte und korrigierte Gravitationsgradienten im erdfesten Koordinatensystem mit Fehlerabschätzung für die transformierten Gradienten Transformationsparameter in erdfeste Koordinatensysteme
SST_PSO_2 <ul style="list-style-type: none"> exakte GOCE Bahnparameter mit dem dazugehörigen Qualitätsbericht
EGM_GOC_2 <ul style="list-style-type: none"> Endgültiges Modell des Erdschwerefeldes von GOCE als Parameter einer Kugelflächenfunktionsentwicklung mit der dazugehörigen Fehlerabschätzung und einem Qualitätsbericht Gitter von Geoidhöhen, Schwerefeldanomalien und Geoidkrümmung mit der dazugehörigen Fehlerabschätzung
EGM_GVC_2 <ul style="list-style-type: none"> Varianz-Kovarianz Matrix des endgültigen GOCE-Gravitationsfeldmodells

DATENZUGANG

DIE ESA STREBT eine breitestmögliche Verwendung dieser Erdbeobachtungsdaten in Forschung und Anwendung an. Alle beschriebenen Produkte sind kostenlos für Forschungs- und nicht kommerzielle Zwecke erhältlich. Nutzer können sich jederzeit mit einem Projektvorschlag um Datenzugang unter <http://eopi.esa.int/goce> bewerben. Mit Genehmigung des Vorschlags durch die ESA erlangen die Bewerber den Status eines Principal Investigator. Das Projektbüro gibt gerne Auskunft. ■



Öresundbrücke und -Tunnel zwischen Dänemark und Schweden verbinden zwei nationale Höhensysteme (Foto: Wikimedia Commons)



Funktionsweise des GPS-Nivellements

WORLDWIDE NET: EIN GLOBALES HÖHENSYSTEM



DIE GEODÄSIE BEFASST sich mit der Vermessung der Erde; ihre Produkte werden in allen Geowissenschaften verwendet. Während man jedoch für die Positionsbestimmung auf der Erdoberfläche nur geometrische Verfahren braucht, benötigt man für die Bestimmung physikalisch aussagekräftiger Höhen das Schwerefeld der Erde. Nur anhand der Potentialunterschiede können wir entscheiden, in welche Richtung das Wasser fließt und wo „unten“ und „oben“ ist.

TRADITIONELL WIRD FÜR die Höhenbestimmung geodätisches Nivellement mit gravimetrischen Messungen kombiniert. Über kleinere Entfernungen erreichen diese Höhenmessungen mm-Genauigkeit, neigen jedoch bei großen Abständen zu systematischen Verfälschungen. Außerdem sind sie zeitraubend und oft mühsam. Diese Schwäche schränkt die Vergleich- und Verknüpfbarkeit von Höhenwerten in benachbarten Ländern erheblich ein. Die Trennung von Festlandbereichen durch die Meere führt unausweichlich zu Diskontinuitäten zwischen den Höhensystemen.

MIT DEM HOCHGENAUEN GOCE-Geoid werden vier Hauptziele für die Weiterentwicklung der Geodäsie erreichbar:

KONTROLLE UND ERGÄNZUNG DES TRADITIONELLEN NIVELLEMENTS DURCH DAS VERFAHREN DES GPS-NIVELLEMENTS

DAS GOCE-GEOID DIENT der Transformation von ellipsoidischen Höhen aus GPS in Meereshöhen, wobei es jedoch für höchste Ansprüche durch lokale Schweredaten ergänzt werden muss.



Die Diskontinuität der Höhensysteme spielt keine Rolle, solange man die verschiedenen Systeme nicht miteinander in Beziehung setzt. Wird dies notwendig, entstehen Probleme: Als 2004 in der deutsch-schweizer Grenzstadt Laufenburg eine Brücke über den Rhein gebaut wurde, legten die Schweizer für ihre Berechnungen das Niveau des Mittelmeers zugrunde, die Deutschen bezogen sich auf Amsterdam und die Nordsee. Die Differenz von 27 Zentimetern zwischen den beiden Messpunkten ist zwar bekannt, statt aber nun das Niveau auf der Schweizer Seite um 27 Zentimeter anzuheben, wie es richtig gewesen wäre, senkte man das Niveau um diesen Betrag. Auf deutscher Seite musste der Straßenanschluss daher um 54 Zentimeter tiefer gelegt werden.
mawi-foto, Dübendorf, Schweiz.



Wie hoch ist der Mount Everest genau? GOCE-Daten werden Klarheit bringen.
Wikimedia Commons

SCHAFFUNG EINES EINHEITLICHEN, GLOBALEN HÖHENSYSTEMS

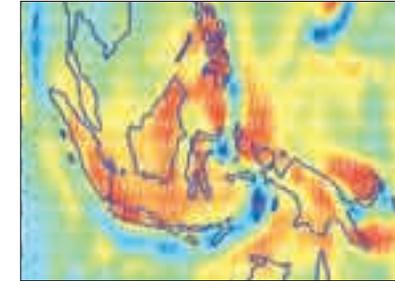
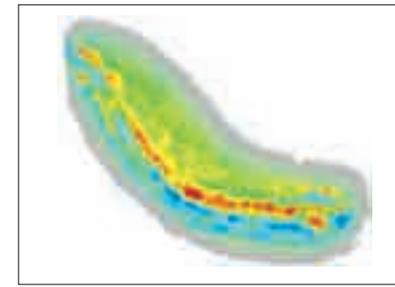
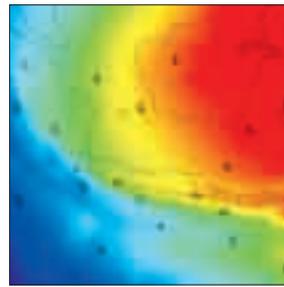
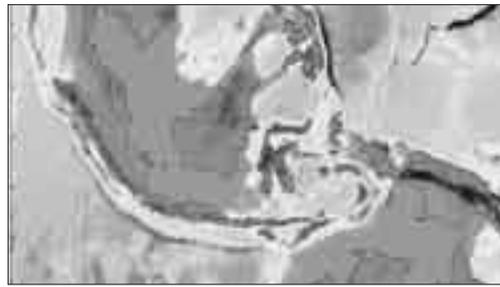
IMMER NOCH GIBT es zahlreiche isolierte Höhensysteme auf der Welt. Jedes System hat einen eigenen Bezugspunkt, meist in Meeresnähe. Dieser Punkt ist durch Nivellement mit dem mittleren Meeresspiegel, wie er durch Pegelstationen am Meer ermittelt wird, verbunden. Mit der Geoid-Genauigkeit, die GOCE erreichen wird, können alle Höhensysteme mit cm-Genauigkeit harmonisiert werden. Voraussetzung ist einzig, dass mindestens ein Messpunkt in jedem Höhensystem mit einer genauen GPS-Positionierung ausgestattet ist.

SICHERE SATELLITENBAHNBESTIMMUNG

MIT DEM GOCE-SCHWEREFELD lassen sich (besonders für Satelliten mit niedriger Umlaufbahn) Bahnabweichungen, die durch Ungenauigkeiten im Schwerfeld verursacht werden, von denen, die durch andere, nicht konservative Kräfte verursacht werden, unterscheiden. Damit werden nicht nur Sonnenwinde und Atmosphärenwiderstand erfasst, sondern auch Ablenkungen, die durch die Gezeiten der Ozeane und der festen Erde verursacht werden. Störungen lassen sich zutreffender modellieren und die Satellitenbahn genauer bestimmen.

DIE TRENNUNG VON TRÄGHEITSKRAFT UND SCHWERKRAFT IN DER TRÄGHEITSNAVIGATION

EINE GENAUE KENNTNIS des Gravitationsfelds, wie GOCE sie ermöglicht, wird die Qualität der Trägheitsnavigation erhöhen. Die Akzelerometer an Bord von Flugzeugen, Fahrzeugen, U-Booten erfassen nicht nur die Bewegung des Fahrzeuges, sondern die Summe von Fahrzeug- und Schwerkraftbeschleunigungen. Der Gravitationsteil der gemessenen Beschleunigung wird dabei durch ein einfaches Schwerfeldmodell beschrieben. Dies verursacht systematische Navigationsfehler, die mit dem GOCE-Schwerfeldmodell beträchtlich reduziert werden. ■



Oben links: Topographie des indonesischen Archipels, Mitte: Globales Geopotentialmodell der Region, das die unzureichende Auflösung der langwelligen Darstellung deutlich macht, die mit bisherigen Satellitendaten erreichbar ist, rechts: In-situ- und Flugzeugmessungen mit hoher Auflösung zeigen die lokalen Details des Schwerefeldes, unten: simulierte GOCE-Messungen für dieselbe Region
Quelle: ESA

EINBLICK INS UNBEKANNTE ERDINNERE

Geophysics ... differs from basic physics and chemistry, in that most important phenomena cannot be isolated in a laboratory. (William Kaula, 1990)



IM LAUFE DER geologischen Geschichte unserer Erde haben die verschiedenen geodynamischen Prozesse, wie die isostatische Kompensation, die Kollision der Kontinente oder die Subduktion komplexe Strukturen von Kruste und Lithosphäre hervorgebracht und tun es noch immer. Diese Strukturen liefern uns je nach Beschaffenheit unterschiedliche Schweresignale, die für geologische Modelle bedeutende Zwangsbedingungen darstellen. Ein Problem jedoch ist, dass terrestrische Schweremessungen in verschiedenen Erdregionen teilweise ganz fehlen, von schlechter Qualität sind oder eine unterschiedliche Auflösung haben und ihre Referenzsysteme nicht kompatibel sind. Dies führt zu erheblichen Diskrepanzen und Inkonsistenzen. Um geologische Prozesse und die Strukturen, die sie verursachen, zu verstehen, benötigt man ein globales, homogenes Feld von Schwereanomalien mit einer möglichst hohen Auflösung.

DIE KOMBINATION DES GOCE-Schwerefeldes mit seismischen Daten wird uns einen detaillierten Einblick in die Dichteveränderungen der Erdkruste und der oberen Mantelschicht bis in eine Tiefe von ca. 200km liefern. Vor allem für die Erforschung der Subduktionszonen, wo sich tektonische Platten treffen, werden die Schweregradientendaten von GOCE sehr nützlich sein. Statische Dichtemodelle sowie numerische Gittermodelle werden herangezogen, um den Verlauf dieser Subduktionszonen zu erfassen. Neue Dichtemodelle, für die die GOCE-Daten wichtige Zwangsbedingungen liefern, können bisherige Interpretationen erweitern und neue Einsichten vor allem für Regionen liefern, für die es bisher wenige oder keine Daten gibt, wie etwa Antarktis oder Himalaja. Ein großer Vorteil der GOCE-Daten ist, dass sie ein konsistentes, globales Schwerefeld über alle künstlichen und natürlichen Grenzen hinweg und auch für Regionen, die schwer zugänglich sind, ermöglichen. ■



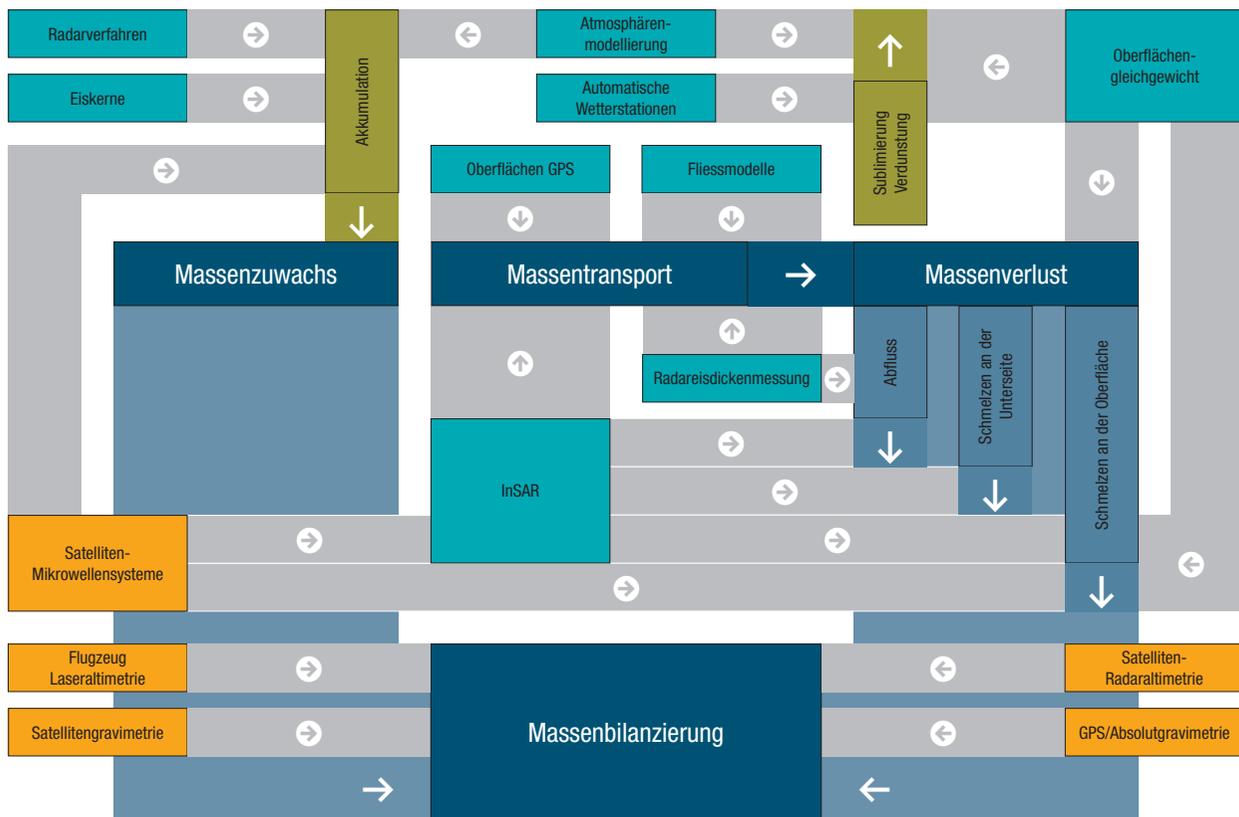
Mit Hilfe von GOCE-Daten hoffen Vulkanforscher, die Verteilung von Magma unter Vulkanen besser zu verstehen und so tektonische Bewegungen und seismische Gefahren besser vorhersehen zu können.
Karsten Berg

NEUE METHODEN MÜSSEN jedoch entwickelt werden, um die GOCE-Gradientendaten voll für geophysikalische Anwendungen nutzen zu können. Die Schwerkraftinformation von GOCE muss außerdem, möglicherweise in Kombination mit Bodendaten, quantifiziert werden, um zu bestätigen, mit welcher Auflösung die Satellitendaten tatsächlich der Krusten- und Mantelstruktur entsprechen. Satelliten- und Bodendaten können mit Vorhersagen aus bereits existierenden 3D-Dichte-Modellen verglichen werden, die auf seismischen und terrestrischen Schwerkraftdaten basieren. Die GOCE-Daten können auch gegen die Schwerefelddaten aus neuen Modellen validiert werden, die mit neuen petrologischen und thermodynamischen Methoden ermittelt wurden. Für regionale Untersuchungen, z.B. für die Exploration von Bodenschätzen, liefert das GOCE-Schwerefeld zuverlässige und genaue Randbedingungen.



Tyrolit

GOCE WIRD AUCH unsere Kenntnisse über die Landhebung erweitern, wie sie durch den postglazialen Ausgleich ausgelöst wird. Dieser Prozess beschreibt die Hebung der Erdkruste um oft mehrere Zentimeter pro Jahr in ehemals vereisten Gebieten. Beispielsweise in Kanada und Skandinavien hebt sich die Erde, nachdem sie vom Gewicht dicker Eisschichten befreit ist, die sie während der letzten Eiszeit zusammengedrückt hielten. Damit verbunden kommt es zu einer globalen Umverteilung von Meerwasser durch schmelzendes Eis. Ein typischer gravitativer Effekt ist hier, dass der Meeresspiegel in der Nähe ehemaliger Eisschichten sinkt und weiter entfernt steigt. Diese Vorgänge besser zu verstehen, erleichtert die Einschätzung potentieller Gefahren durch Meeresspiegeländerungen in Gegenwart und Zukunft. ■



KOMMEN UND GEHEN - DAS GLEICHGEWICHT DER EISMASSEN



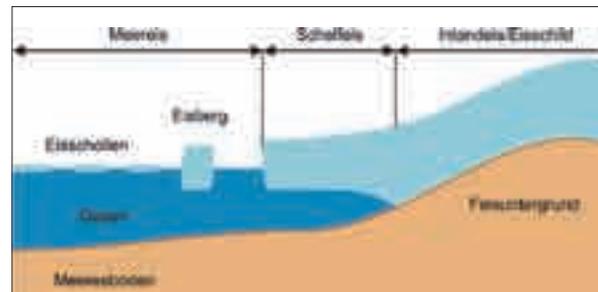
DAS KLIMASYSTEM BESTEHT aus komplexen Wechselwirkungen zwischen Sonneneinstrahlung, Atmosphäre, den Ozeanen und den Landmassen mit ihrer Biosphäre. In den Polargebieten kommt als zusätzliche Größe das Eis hinzu. Auf Veränderungen des Klimas reagieren die Eisschilde durch Zu- und Abnahme. Die Reaktionen sind jedoch zeitverschoben und langsam. So fungieren die Eisschilde quasi als Dämpfungsmechanismus, als Reservoir, mit dem das Klimasystem Spitzen und Senken ausgleicht.

MEEREIS UND GLETSCHER tauschen stetig Süßwasser mit den Ozeanen aus: Sie nehmen durch Schnee, der dann allmählich zu Eis wird, an Masse zu und verlieren Masse durch das Abschmelzen von Eis. Eis kann sich ablösen und zu Eisbergen werden. Diese Vorgänge bestimmen das Massengleichgewicht der Eisschilde. Bisher konnte man die Einzelbeiträge nicht ausreichend quantifizieren – nur die Topographie des Eises konnte von Satelliten bestimmt werden, Eisdicken nur punktuell durch Bohrungen gemessen werden. Um das Massengleichgewicht zu ermitteln, behilft man sich bisher mit Schätzungen.

MIT DER GOCE-MISSION erhalten die Polarforscher erstmalig ein hochgenaues Schwerfeld für Grönland und die Antarktis mit einer räumlichen Auflösung von 100 km halbe Wellenlänge. Aus Eisaltimetrie im Rahmen der Missionen ICESAT und CRYOSAT entstehen hochgenaue Messreihen über Volumenänderungen; die Mission GRACE liefert zusätzlich deren zeitliche Variationen und damit Schätzungen über Gewichtszunahme und Verluste der Eisschilde. Für ein besseres Verständnis des Eismassenflusses werden diese Daten noch durch Messungen der Eisdicke vor Ort ergänzt, GPS-Zeitreihen auf Fels komplettieren das Geobeobachtungssystem mit Informationen über Landhebungsraten. Dennoch – die Eismassenbilanzierung stellt eine große wissenschaftliche Herausforderung dar.



Ekström Schelfeis,
Hannes Grobe, AWI



Antarktisches Schelfeis im Querschnitt:
Die Stabilität und der Massenhaushalt des Schelfeises ist bedeutsam für die Auswirkungen des Anstiegs der Meeresspiegel, der sich durch eine Erwärmung des Klimas ergeben könnte. Lösen sich Eisschelfe aus ihrer Verankerung, weil der Meeresspiegel angestiegen ist, sind sie nicht mehr in der Lage, das Inlandeis zurückzustauen. Derzeit ist noch unklar, ob das Vorrücken der Schelfeiskante seit 1957 ein normaler Prozess ist oder bereits eine Auswirkung der Klimaerwärmung.

ZENTRALE GRÖSSEN DER Eismassenmodellierung sind die Mächtigkeit und die topographische Form und Beschaffenheit des Untergrundes. Während Oberflächengeometrie und Flussgeschwindigkeit mit Satelliten sehr genau messbar sind, ist die Erfassung des Untergrundes schwierig. Bohrungen gibt es nur an wenigen Stellen, sie bilden jedoch wichtige Bezugspunkte. Die Bodentopographie lässt sich mit Radarverfahren vom Flugzeug aus vermessen, doch diese Messungen sind zumindest in der Antarktis nur bruchstückhaft vorhanden. Da die topographische Grenzschicht zwischen Fels und Eis der dominierende Dickenkontrast ist, lässt sich aus

dem GOCE-Schwerefeldmodell und insbesondere aus den Gradienten der Verlauf der Bodentopographie relativ genau ableiten. Der Ansatz ist mit der Bestimmung der Ozeanbodentopographie aus dem Verlauf der Meeresoberfläche vergleichbar. Erst detaillierte Untersuchungen werden die Genauigkeit und den Nutzen dieser Vorgehensweise beurteilen lassen. Leider bleiben wegen der sonnensynchronen Bahn von GOCE die Polkappen mit einem Radius von zirka 390 km nicht abgedeckt. Wichtig ist jedoch die Analyse der Verhältnisse insbesondere entlang der Kontaktlinie (grounding line) des Übergangs der Eismassen vom Land- zum Meereis.

SEHR KONKRET WIRD der Nutzen des GOCE-Geoidmodells für die Massenbilanzierung des Meereises sein. Die Abnahme an Umfang und Volumen des Treibeises in der Arktis und im Zirkumpolarmeer um die Antarktis sind viel diskutierte Indikatoren des Klimawechsels. Im Fall der Arktis sind sie gekoppelt an heikle politische und ökonomische Fragestellungen. Die Oberflächenform des Meereises ist mit Satellitenaltimetrie gut messbar. Schwieriger ist bereits die Erfassung der Rauigkeit. Von ihr hängt das Reflexions- und Absorptionsverhalten gegenüber der Sonnenstrahlung ab. Volumenabschätzungen werden unter Nutzung des Schwimmgleichgewichts erstellt. Dies setzt voraus, dass die Oberflächengeometrie als Topographie über dem Meeresspiegel bekannt ist. Für zusammenhängende Zonen mit Treibeis ist eine Umrechnung auf Meereshöhen nur mit Hilfe eines genauen Geoidmodells möglich, eventuell noch ergänzt durch ein Modell der dynamischen Topographie aus einem Zirkulationsmodell. Gerade im arktischen Ozeanbereich sind die Zirkulationsmodelle noch stark widersprüchlich und nur ein möglichst hochauflösendes Geoidmodell, so wie GOCE es bieten wird, ermöglicht einen vernünftigen Ansatz. ■



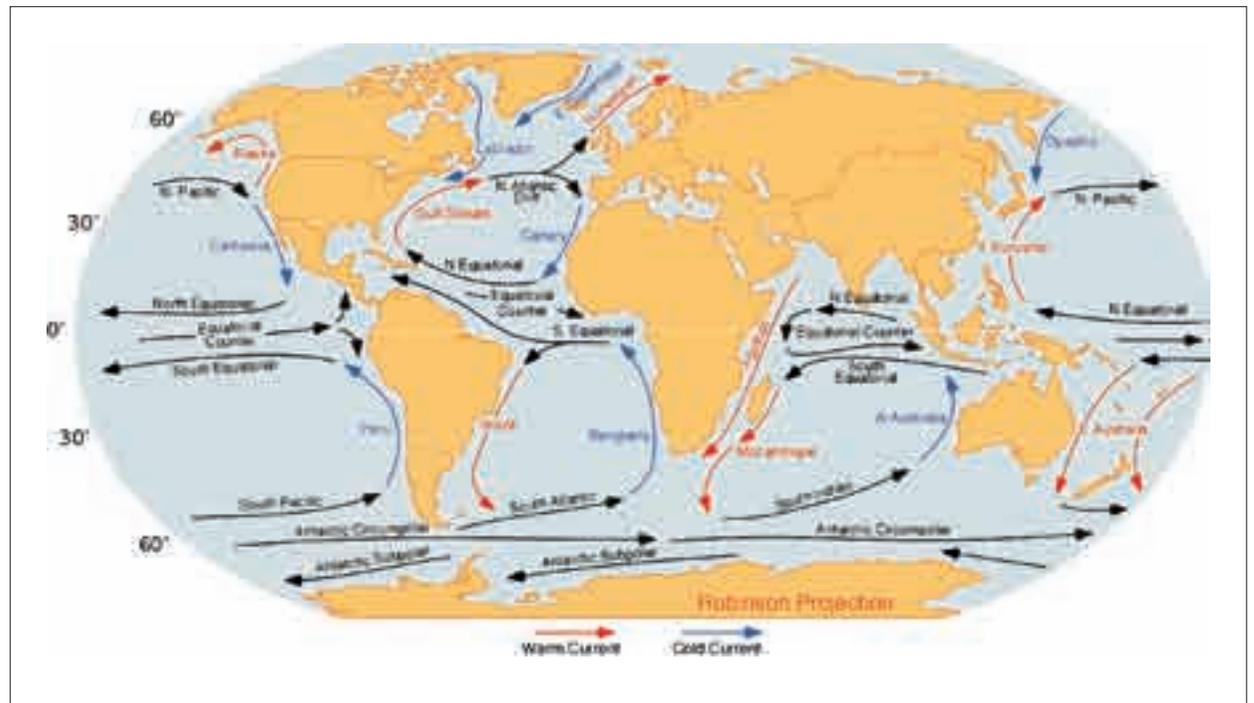
Die Antarktis nahe der
GARS O'Higgins Antarktisstation,
Christian Plötz, BKG

DIE OZEANZIRKULATION

The ocean circulation is a central element in any understanding of the earth's climate, how it was different in the past and how it may be different in the future.
C. Wunsch 1993

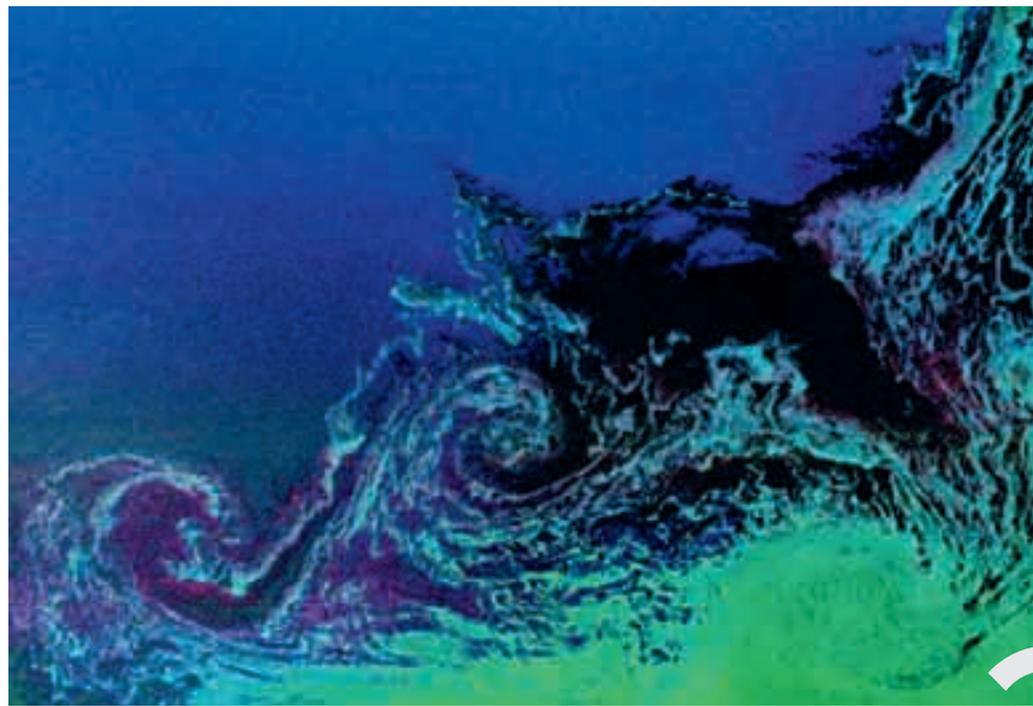


DIE OZEANE SIND ein zentrales Element des Erdsystems und unseres Klimas. Sie sind die Quelle des Lebens und Motor des globalen Wasserkreislaufs. Den Ozeanen ist zirka die Hälfte des ständigen Temperaturausgleichs zwischen Äquatorzonen und Polgebieten zu verdanken, die andere Hälfte geschieht in der Atmosphäre. Veränderungen des globalen Strömungskreislaufs in den Ozeanen hätten signifikante Folgen in unserem Klimasystem.



Meeresströme Quelle: Wikimedia

DIE ERFASSUNG DES globalen Strömungssystems ist von zentraler Bedeutung für die Entwicklung realistischer Klimamodelle, für die Quantifizierung des Transportverhaltens der Meere, für die Bioproduktivität der Ozeane, die Speicherfähigkeit von CO₂ und die Optimierung von Schiffsrouten. In der Ozeanographie entstanden in den zurückliegenden Jahrzehnten hervorragende numerische Zirkulationsmodelle. Dennoch ist die Datengrundlage dieser Modelle unzureichend, denn die verwendeten Messdaten von Temperatur und Salzgehalt, Druck oder Fließgeschwindigkeit sind weder flächendeckend noch global. Es sind „In-situ“-Stichproben entlang der großen Schifffahrtsrouten, von einigen Forschungsreisen oder von Bojen bzw. Driftern. GOCE in Verbindung mit Satellitenaltimetrie bietet erstmals die Möglichkeit der globalen Erfassung der Oberflächenzirkulation.



WELCHES PRINZIP LIEGT diesem Ansatz zugrunde? Das GOCE-Geoid ist eine hypothetische Ruhefläche der Weltmeere, also die Ozeanfläche, wie sie ohne äußere Einwirkung durch Winde, Hoch- und Tiefdruckgebiete oder Gezeiten wäre, eine Fläche, deren Form nur durch das Schwerefeld, also die Massenverteilung der Erde und die Erdrotation entsteht, gleich einer riesigen, perfekten Wasserwaage. Die wirkliche Meeresfläche lässt sich heute von Satelliten aus mit Radarpulsen ziemlich genau abtasten. Die amerikanischen bzw. amerikanisch-französischen Missionen Seasat, Geosat, Topex, Jason und die ESA-Satelliten ERS-1, ERS-2 und Envisat liefern nun schon seit mehr als 20 Jahren globale Abbilder der Meeresoberfläche. Die Abweichung der aktuellen Meeresoberfläche vom Geoid heißt dynamische Ozeantopographie (DOT).

ÄHNLICH DER TOPOGRAPHIE auf dem Land stellt die Ozeantopographie die Höhe der Meeresoberfläche über dem Geoid dar – mit sehr kleiner Auslenkung jedoch, sie beträgt nur maximal ein bis zwei Meter. Dies allein verdeutlicht die hohen Anforderungen, die an die Genauigkeit der Altimetrie und des GOCE-Geoids gestellt werden müssen. Die „Berge und Täler“ der dynamischen Ozeantopographie markieren die Strömungssysteme der Weltmeere. In geostrophischer Näherung lässt sich diese Topographie direkt übersetzen in das Geschwindigkeitsfeld der Ozeanzirkulation. Damit wird die klassische Hypothese eines „Level of no motion“ durch ein „level of known motion“ ersetzt, eine zentrale Randbedingung der Ozeanographie. Der Ansatz ermöglicht erstmals, die Oberflächenzirkulation global und als Zeitreihe zu erfassen.

STRUKTUREN BIS ZIRKA 100 km Ausdehnung lassen sich durch die räumliche Auflösung mit GOCE im Strömungssystem erkennen. Die kleinstmöglichen, in den Ozeanen vorkommenden, quasi stationären Strukturen der dynamischen Topographie sind eine Funktion des Rossby-Radius und werden mit GOCE nicht ganz erreicht. Die dynamische Topographie aus GOCE und Altimetrie liefert demnach eine entscheidende Randbedingung für Zirkulationsberechnungen, aber auch für Abschätzungen des Massen- und Wärmetransport durch den relevanten „Schnitt“ durch die großen Strömungssysteme. Hier ist die Brücke zur Klimatologie zu sehen. Wichtige Untersuchungsgebiete sind unter anderem der Nordatlantik, der Zirkumpolarstrom mit dem Weddell-See und die Strömungssysteme der Schelfgebiete. ■

SAR-Aufnahme des Weddellwirbels nordwestlich des Südpols. Mit GOCE sind solche kleineren Meereswirbel erstmalig zu erfassen. NASA

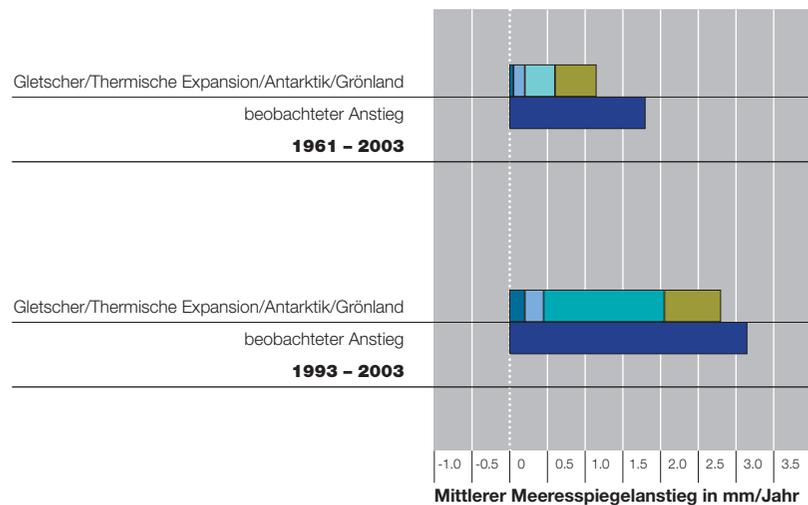
HIER FLIESST ALLES ZUSAMMEN: DER MEERESSPIEGEL

SEITE

22



DER ANSTIEG DES Meeresspiegels ist einer der wichtigsten Indikatoren in der Klimaforschung mit großen Auswirkungen auf unsere Umwelt und unsere sozioökonomischen Systeme. Im letzten Jahrhundert stieg der globale durchschnittliche Meeresspiegel um 10 – 25 Zentimeter, die Vorhersagen für das nächste Jahrhundert liegen mit einem Anstieg von 50 – 70 Zentimetern wesentlich höher. Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung lebt in Küstenregionen und ist von der landwirtschaftlichen und industriellen Produktivität dieser Gebiete abhängig. Der beschleunigte Meeresspiegelanstieg wird für sie daher einschneidende Konsequenzen haben. Betroffen sind neben Gebieten wie die Malediven, die nur geringfügig über dem Meeresspiegel liegen oder Bangladesh mit dem weitverzweigten Ganges-Brahmaputradelta auch europäische Gebiete, wie die Ostküste Englands, die niederländischen und norddeutschen Küsten.



Envisataufnahme der Küste von Bangladesh, ESA

HAUPTFAKTOREN DER MEERESSPIEGELÄNDERUNG sind einerseits die Wärmeausdehnung der Ozeane infolge einer verringerten Dichte des Wassers und andererseits die Zunahme der totalen Wassermasse. Dies geschieht, wenn an Land gelagerte Wassermassen (insbesondere in Eisform) abschmelzen. Man nimmt an, dass bis zu 90 Prozent der Süßwasservorräte der Erde als Eis gelagert sind und ein gleichzeitiges Abschmelzen der Antarktis, Grönlands und der Berggletscher sowie der kleineren Eiskappen ein globales Ansteigen des Meeresspiegels um rund 70 Meter auslösen würde. Dies wird in absehbarer Zeit nicht geschehen, aber auch ein partielles Abschmelzen hätte schon sehr weitreichende Konsequenzen.

IN DIE MEERESSPIEGELFORSCHUNG fließen Ergebnisse aus allen bisher beschriebenen GOCE-Anwendungsgebieten ein. Auch beim Thema Meeresspiegel ist die richtige Zuordnung von Ursachen und Folgen die große Herausforderung: Wie viel Meeresspiegelanstieg wird wo zu welchem Zeitpunkt durch welche Prozesse verursacht?

Pegelmessstation in
Büsum Nordsee

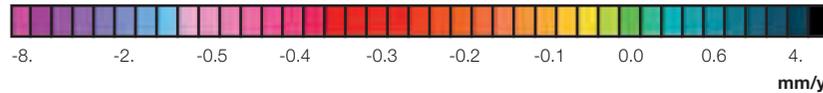
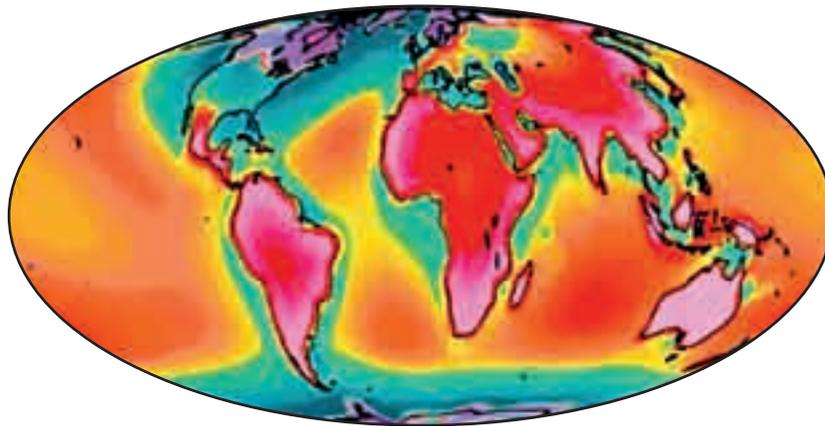


DIE VERÄNDERUNGEN DES Meeresspiegels werden an vielen Orten entlang der Küsten mit Pegeln erfasst. Einige der Messreihen reichen schon mehrere Jahrhunderte zurück. Die Messreihen bilden sehr wertvolles Datenmaterial zur Erforschung von Meeresspiegelveränderungen. Vom Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) in Liverpool werden diese Daten gesammelt und ausgewertet und im Rahmen des Global Sea Level Service (GLOSS) untersucht. Mit Pegeln wird jedoch nur die relative Veränderung des Meeresspiegels am Aufstellort des Messapparats registriert. Dies bedeutet, dass das Messsignal einerseits alle Veränderungen des Meeresspiegels wiedergibt, andererseits aber auch alle Vertikalbewegungen des Aufstellorts. Letztere können rein lokale Ursachen haben, regionale tektonische Prozesse widerspiegeln oder aber großräumige postglaziale Hebungen enthalten. Zwar werden viele Pegelstationen wiederholt durch Nivellement in nationale Höhensysteme integriert, doch reicht dies nicht aus, um das Meeresspiegel- vom Landsignal sauber zu trennen. Mit dem GOCE-Geoid, ergänzt durch regionale Geoidverfeinerungen, in Kombination mit sehr genauer GPS-Positionierung sollte es erstmals möglich werden, dem globalen System von Meeresspiegelstationen einen global gültigen Höhenbezug zu geben.

AUS HISTORISCHEN GEZEITENPEGEL-DATEN und aus aktuellen Messungen und Modellen weiß man, dass zukünftige Änderungen des Meeresspiegels keinesfalls global gleich sein werden. Doch weder die Einzelbeiträge der verschiedenen Einflussfaktoren noch ihre globale Verteilung sind bekannt.



Pegelmessstationen
in Europa, ESEAS



Räumliche Abweichungen des globalen, relativen Meeresspiegelanstiegs verursacht durch die Postglaziale Landhebung wie vorhergesagt durch das Modell ICE 4G-VM2 Peltier 1998, Quelle: ESA

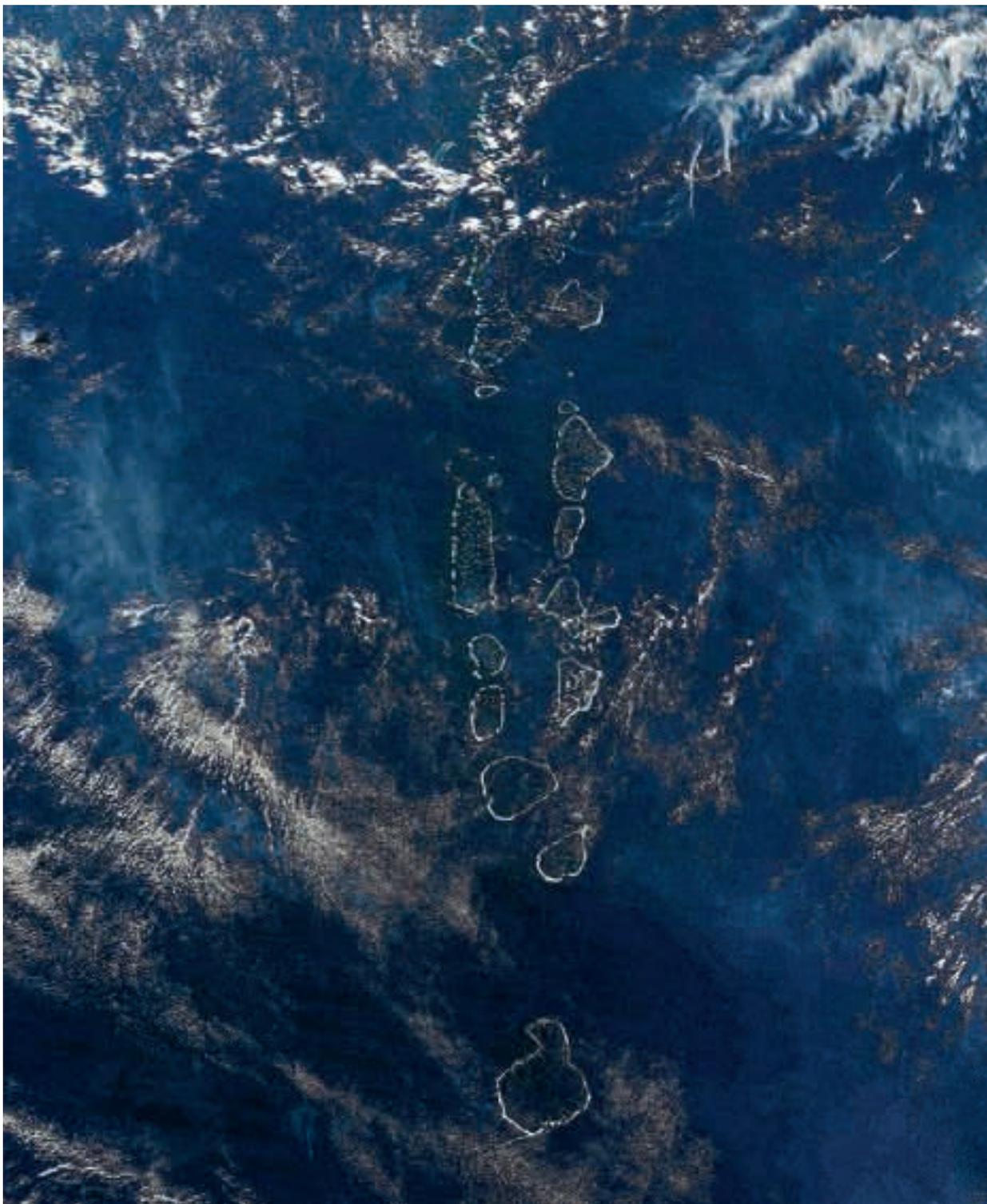
DAMIT WERDEN DIE Pegelstationen aus ihrer „spendid isolation“ erlöst. Meeresspiegelveränderungen lassen sich von geodynamischen Einflüssen trennen und Messreihen in Australien, Asien, Amerika, Afrika, Europa und Antarktis sowie auf vielen Inseln werden vergleichbar. Aus Einzelmessreihen entsteht ein global zusammenhängender Prozess.

GLOBALE MEERESSPIEGELVERÄNDERUNGEN LASSEN sich auch mit Satellitenaltimetrie erfassen. Es zeigt sich, dass die Veränderungen alles andere als global uniform sind. Während in vielen Regionen der Erde der Meeresspiegel steigt, gibt es auch Gebiete, in denen er sinkt. Die Dynamik dieses Veränderungsprozesses ist direkt an die Dynamik der globalen Meereszirkulationssysteme gekoppelt, und damit auch an klimatische Veränderungen. Auch hier ist die im Abschnitt „Ozeanzirkulation“ behandelte Erfassung der globalen dynamischen Ozeantopographie aus GOCE und Altimetrie sehr wichtig, um die Physik dieses komplexen Prozesses verstehen zu lernen.

IN DER ÜBERGANGSZONE vom Land zur See sind die Altimetriemessungen wenig zuverlässig. Mehrfachreflexionen und die Anpassung der Auswertung der reflektierten Radarsignale verursachen Messfehler und systematische Verfälschungen. Dies führt dazu, dass bis heute kein konstantes Bild von Altimetrie und Pegelzeitreihen hergestellt werden kann. Das GOCE-Geoid wird dazu beitragen, die Verknüpfung von den Meeresspiegelzeitreihen der Pegel mit denen der Satellitenaltimetrie herzustellen. Gleichzeitig werden auch die letzten gravimetrischen Fehleranteile der Bahnberechnung beseitigt und somit der geographisch korrelierte Restfehler der altimetrischen Meeresfläche eliminiert.

DIE BEIDEN WICHTIGSTEN Ursachen eines klimabedingten Meeresspiegelanstiegs sind die Wärmeausdehnung der Ozeane und das Abschmelzen großer Eisschilde. Da ein detailgenaues Geoid zu einer verbesserten Eismassenbilanzierung beiträgt (vergl. Abschnitt Gleichgewicht der Eismassen), trägt GOCE auch auf diesem Weg zu einem verbesserten Verständnis des globalen Meeresspiegels bei.

PEGELDATEN IN SKANDINAVIEN zeigen beispielsweise, dass die eigentliche Veränderung des Meeresspiegels von einem signifikanten Signalanteil der postglazialen Landhebung überlagert ist. Diesen Anteil gilt es zu isolieren. Man bedient sich geodynamischer Modelle für die postglaziale Landhebung (Englisch: Postglacial Rebound- PGR oder Glacial Isostatic Adjustment-GIA). Mit einem genaueren PGR-Modell und Modellen der lokalen Tektonik lassen sich die historischen Pegeldaten korrigieren. Auch hierzu wird GOCE mit seinen Schwereanomalien einen Beitrag liefern. So kann man über längere Zeiträume restriktivere Nebenbedingungen für den Meeresspiegelanstieg in Klimamodellen formulieren. Aus diesen Erkenntnissen wiederum lassen sich Prognosen für zukünftige Veränderungen treffen, auch für Küsten, an denen es keine Pegelmessstationen gibt. ■



Malediven, NASA

SEITE
26
**CHANCEN UND
HERAUSFORDERUNGEN
FÜR GOCE**



DIE SCHWEREFELDMISSION GOCE hat darüber hinaus eine Schlüsselrolle als Komponente eines globalen Erfassungs- und Überwachungssystems für das System Erde....Von besonderem Wert ist die Konsistenz der präzisen Information über das hochauflösende Schwerefeld bis zu einer Auflösung von unter 100km. Damit wird es erstmalig gelingen, konsistente präzise Schwereanomalien für die Lösung des inversen Problems, also der Bestimmung der Dichteverteilung der Erdkruste, abzuleiten. Erstmalig wird man in der Lage sein, Meeresströmungen zu bestimmen und die Struktur des Meeresspiegelveränderungen zu erfassen und damit zuverlässige Kriterien für eine langfristige Klimaentwicklung zu erhalten. ■

K.-H. Ilk,
**Astronomische, physikalische und
mathematische Geodäsie,
Universität Bonn**

EINE EINMALIGE CHANCE besteht ...möglicherweise, die Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstante G entscheidend zu verbessern,... die Präzision von G auf 6 bis 7 signifikante Stellen zu erweitern. ■

W. Jakoby,
**Institut für Geowissenschaften,
Universität Mainz**

Mitglieder des
GOCE-on der oberen
Breeze-Stufe, ESA-
AOES Medialab





In 295 km Höhe löst sich GOCE sich von der oberen Breeze-Stufe, ESA-AOES Medialab

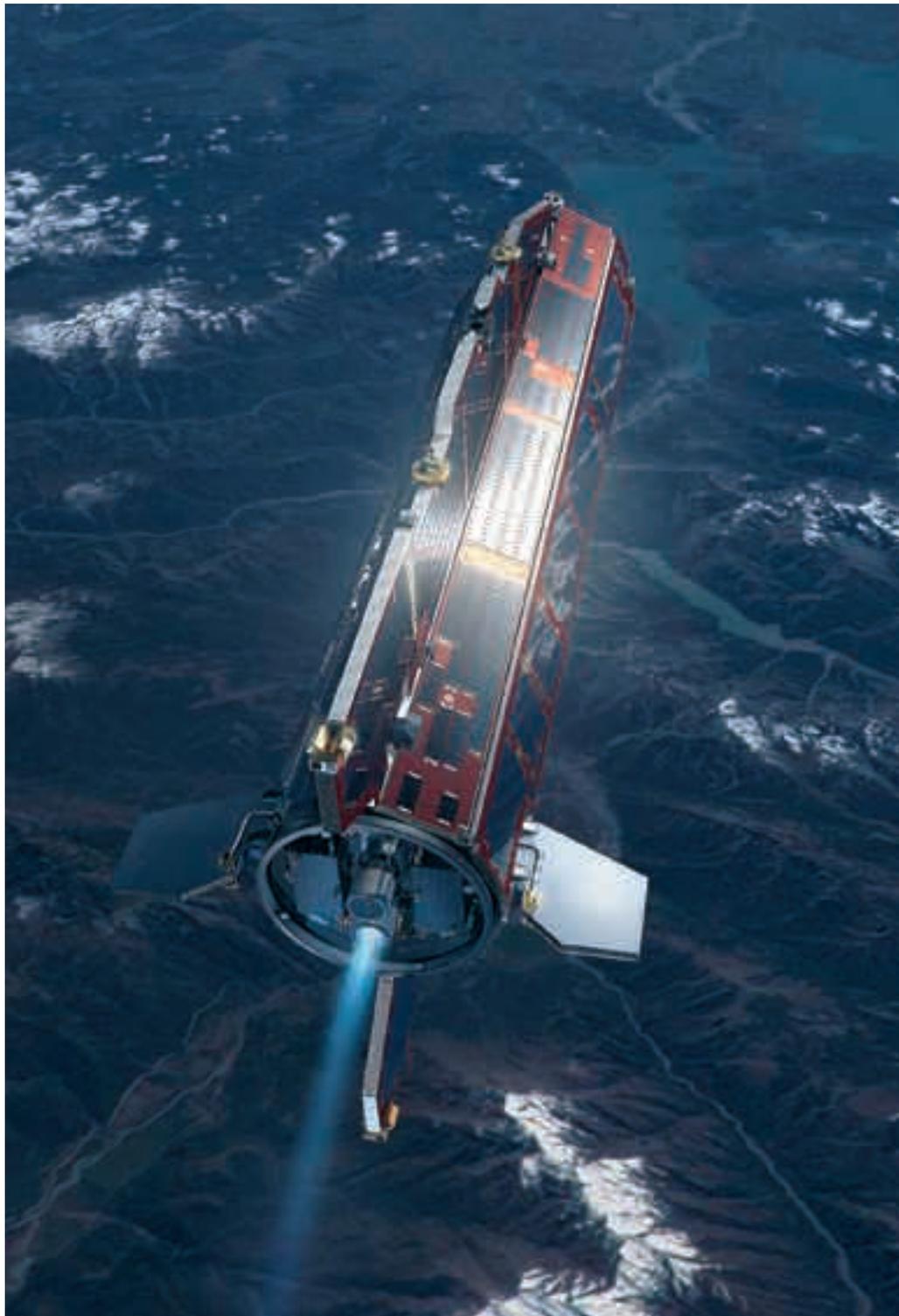
WIE GUT WIRD die Trennung von statischen und dynamischen Effekten gelingen? – Das Schweresignal gibt die gesamte Massenverteilung wieder, unabhängig von mechanischen Modellvorstellungen und Ursachen, Vorgeschichten und Prozessen. Die Frage wird daher immer sein, welche Ideen, Modellvorstellungen und „Manipulationen“ die Interpretatoren in die Inversion und Interpretation hineinstecken. ■

WIE ZUVERLÄSSIG KANN man [dabei] alle a priori Informationen nutzen, wobei es aber nicht so ist (...), dass jede Korrelation zwischen Schwere und anderen Daten automatisch einen direkten ursächlichen Zusammenhang anzeigt? ■

WIE KANN MAN die Inversionsaufgaben so formulieren, dass die relevanten Informationen weitgehend berücksichtigt werden, während die für gegebene Fragestellungen irrelevante Information ineffektiv gehalten werden? Es wird vermutlich umfangreiche Tests und ein gewisses Maß an intuitiver Beurteilung erfordern. ■

W. Jakoby,
Institut für Geowissenschaften,
Universität Mainz

ESA-Aoes Medialab



DAS GOCE-PROJEKTBURO DEUTSCHLAND



Das Projektbüro wird über das DLR durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert
Fördernummer 50 EE 01 03.



DAS GOCE-PROJEKTBURO DEUTSCHLAND am Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie (IAPG) der TU München arbeitet seit 2001 an der Vorbereitung, Initiierung, Koordination und Betreuung einer umfassenden Nutzung der GOCE Mission in Deutschland. Die Nutzung beinhaltet eine Beteiligung an der Schwerefeldmodellierung (Level 2) und die Anwendung der GOCE-Schwerefeldprodukte in Wissenschaft und Praxis (Level 3). Damit soll eine Spitzenstellung Deutschlands im ESA-Erdbeobachtungsrahmenprogramm sichergestellt werden.

**BITTE KONTAKTIEREN SIE UNS
UNTER:**

**GOCE-Projektbüro Deutschland am
IAPG der Technischen Universität
München**

Dr. Anja Schlicht, Sabine Lange
schlicht@bv.tum.de
lange@bv.tum.de

DAS PROJEKTBURO UNTERSTÜTZT den Informationsaustausch mit der DLR, ESA sowie komplementärer Nutzergruppen. Wir wollen neue potentielle Nutzergruppen ansprechen und Arbeitsfelder für Schwerefelddaten identifizieren. Im weiteren Verlauf des Projekts koordinieren und betreuen wir die Datennutzung. Mit der Vorbereitung und Durchführung von Nutzerworkshops in Deutschland schaffen wir eine Plattform für den wissenschaftlichen Dialog. Neben den wissenschaftlichen Zielgruppen möchten wir auch die interessierte Öffentlichkeit über den Missionshergang informieren, zumal die Mitarbeit der deutschen Wissenschaftlergruppen an dieser anspruchsvollen Satellitenmission ein herausragendes Beispiel für das Zusammenwirken von Wissenschaft, Forschung und Industrie darstellt. ■

IMPRESSUM:



HERAUSGEBER: GOCE-Projektbüro Deutschland
Reinhard Rummel

REDAKTION: Sabine Lange, Anja Schlicht

TEXTE: Sabine Lange, Anja Schlicht

KONZEPT UND LAYOUT: konzeptundform, Halle

KONTAKT: GOCE-PROJEKTÜRO DEUTSCHLAND
Am Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Der Technischen Universität München
Anja Schlicht, Sabine Lange
Arcisstraße 21
80333 München

TELEFON: +49 (0)89-289 23 196
www.goce-projektbuero.de



GOCE wird vom Kosmodrom Plesetsk im Norden Russlands auf einer Rocket-Trägerrakete gestartet. Rund neunzig Minuten nach dem Start löst die obere Stufe den GOCE-Satelliten ab. Dies geschieht zirka 295 km über Mitteleuropa im Bereich der Bodenstationen in Skandinavien.
ESA-AOES Medialab

**To explain all nature is too difficult a task
for any one man or even any one age –
Tis much better to do a little with certainty,
& leave the rest for others that come after you,
than to explain all things by conjecture without
making sure of any thing.**

Isaac Newton, 1704

