

# Bestimmung von Satellitenbahnen und Erdschwerefeld zur Erdbeobachtung

nachhaltig<sup>3</sup>

Nachhaltigkeitstag der 3 Berner Hochschulen  
5. November 2021

Die Gruppe Satellitengeodäsie des Astronomischen Instituts der Universität Bern

## Tieffliegende Satelliten für die Erdbeobachtung

Zum Zwecke der Erdbeobachtung kreisen zahlreiche Satelliten in tiefen (d.h. etwa 200-2'000 km hohen) Umlaufbahnen um die Erde; man spricht von sog. LEOs (engl. "Low Earth Orbiter"). Für viele davon ist die Kenntnis sehr genauer Positionen zu jeder Zeit entscheidend. Will man z.B. den globalen und regionalen Anstieg des Meeresspiegels mit Satellitenaltimetrie vermessen (s. Abb. 1 und 4), muss die Satellitenposition mit cm oder besserer Genauigkeit bekannt sein.

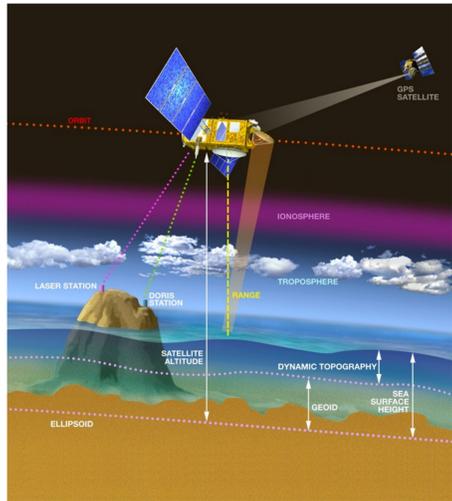


Abbildung 1: Prinzip der Satellitenaltimetrie. ©CLS/AVISO

Um diese Genauigkeit zu ermöglichen, tragen diese LEOs üblicherweise einen GNSS (Global Navigation Satellite System)-Empfänger an Bord (Abb. 1) – die meisten für GPS, aber neuere Satelliten auch z.B. für das europäische Galileo. Am Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) berechnen wir daraus hochpräzise LEO-Bahnen, wobei wir dazu die auch am AIUB gerechneten Bahnen der (hochfliegenden) GNSS-Satelliten verwenden. Wir nutzen dazu die von uns entwickelte Bernese GNSS Software, welche auch von über 700 anderen Institutionen (Universitäten, Forschungseinrichtungen etc.) weltweit verwendet wird.

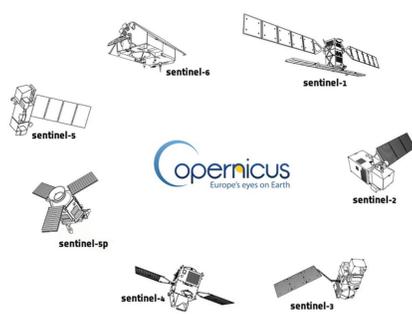


Abbildung 2: Die Flotte der ESA Sentinel-Satelliten. ©ESA

Hinsichtlich LEO-Aktivitäten ist das AIUB u.a. Teil der Copernicus Precise Orbit Determination Quality Working Group, im Rahmen derer wir zu Vergleichs- und Validierungszwecken die Bahnen der ESA Sentinel-1, -2, -3 und -6 Erdbeobachtungssatelliten operationell berechnen (Abb. 2 und 5). Diese Satelliten stellen das Raumsegment von Copernicus dar, dem Erdbeobachtungsprogramm der Europäischen Union (<https://www.copernicus.eu>), s. Abb. 3.

- Atmosphäre monitoring
- Marine environment monitoring
- Emergency management
- Land monitoring
- Climate change
- Security

**Copernicus**  
Europe's eyes on Earth

Abbildung 3: Das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus liefert frei verfügbar Daten für umwelt- und sicherheitsrelevante Fragestellungen und ist thematisch in sechs Dienste gegliedert. ©Copernicus

## SATELLITE DATA: 1993-PRESENT

Data source: Satellite sea level observations.  
Credit: NASA's Goddard Space Flight Center

## RATE OF CHANGE

↑ 3.4  
millimeters per year

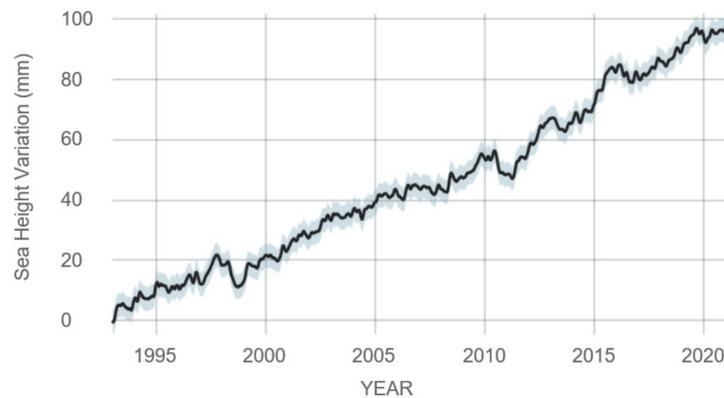


Abbildung 4: Aus Satellitendaten gewonnene Änderung des globalen Meeresspiegels seit 1993. ©NASA

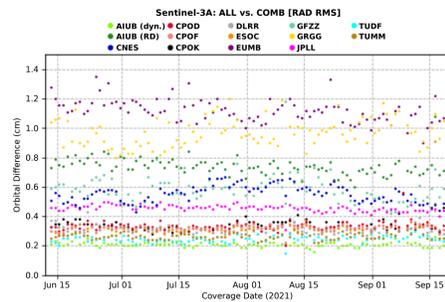


Abbildung 5: Radiale Differenzen verschiedener Bahnösungen für Sentinel-3A (ein Altimetriesatellit), und einer kombinierten Lösung. Die Bahnen wurden für den Copernicus Regular Service Review #22 berechnet. Das AIUB trägt mit dynamischen (hellgrün) und reduziert-dynamischen (dunkelgrün) Bahnösungen bei. Die erstgenannten AIUB-Lösungen gehören zu den besten der Quality Working Group.

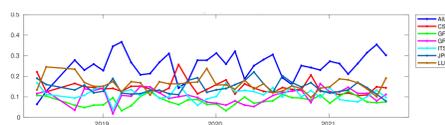


Abbildung 6: Gewichte, mit denen verschiedene monatliche GRACE-FO Lösungen in eine kombinierte Lösung einfließen. Die Kombination wird im Rahmen von COST-G am AIUB operationell gemacht. Für die meisten Monate trägt die am AIUB gerechnete Einzellsung am stärksten bei.



Abbildung 7: Die GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On) Mission zur Messung des zeitvariablen Erdschwerefeldes. ©NASA



Die offiziellen GRACE/GRACE-FO Schwerefeldmodelle werden vom Jet Propulsion Laboratory (JPL), vom Center for Space Research der Universität von Texas (UTCSR) und vom Deutschen GeoForschungs-Zentrum (GFZ) berechnet. Daneben gibt es aber zahlreiche andere Analysezentren, darunter das AIUB, welche unabhängige Modelle rechnen und diese stetig zu verbessern suchen. Der vom AIUB koordinierte Combination Service for Time-variable Gravity Fields, COST-G (<http://cost-g.org>) der International Association of Geodesy (IAG) entwickelt und untersucht Strategien, um die monatlichen Schwerefeldmodelle diverser Analysezentren zu kombinieren und so bestmögliche Modelle für eine breite Nutzergemeinde zu erzeugen (Abb. 6 und 10).

## Von Bahnen zum Schwerefeld

Das Schwerefeld der Erde, d.h. das Abbild der lokalen gravitativen Anziehungskraft, ist räumlich und zeitlich variabel (Abb. 8) und wird von Massenlagerungen in, auf und über der Erde beeinflusst. Da die Schwerkraft die hauptsächlichste auf einen Satelliten wirkende Kraft darstellt, hat sie einen Einfluss auf dessen Bahn. Umgekehrt kann aus der genauen Analyse der Bewegung eines Satelliten über einen längeren Zeitraum auf das Erdschwerefeld geschlossen werden.

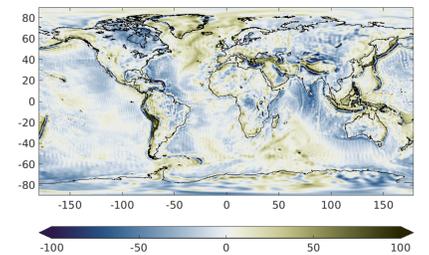


Abbildung 8: Abweichungen der lokalen Schwerebeschleunigung von einer theoretischen Beschleunigung wenn die Erde ein Rotationsellipsoid wäre. Einheiten: mGal = 0.00001 m/s<sup>2</sup>.

Um das Erdschwerefeld, und insbesondere dessen zeitliche Variation, bestmöglich zu messen, machen die Satellitenmissionen GRACE (2002-2017) und GRACE-FO (seit 2018) auch Gebrauch von einem hochgenauen Mikrowellen- bzw. Laserlink (für GRACE-FO) zwischen zwei LEOs auf identischer Bahn (Abb. 7). Damit wird die Distanz zwischen den Satelliten (ca. 220 km) hochgenau (im Bereich von µm mit Mikrowelle und nm mit Laser) gemessen. Aus den damit gewonnenen Schwerefeldmodellen lassen sich zahlreiche geophysikalische Prozesse untersuchen und quantifizieren (Abb. 9 und 10).



Grundwasser stellt schätzungsweise 30% der globalen Süßwasserspeicher dar und ist eine Essential Climate Variable (ECV) des Global Climate Observing System (GCOS), d.h. eine Größe, die kritisch ist, um das Klima und dessen Änderungen zu charakterisieren.

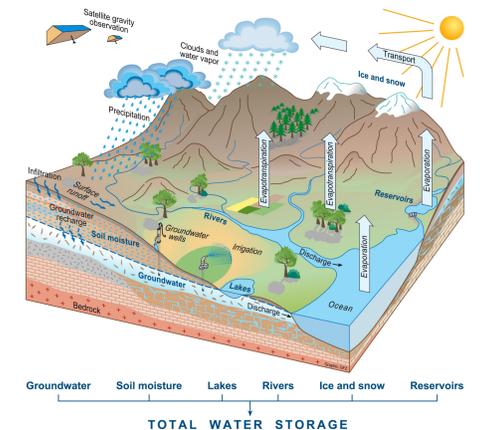


Abbildung 11: GRACE/GRACE-FO ist die einzige Technik, mit welcher man den Total Water Storage (TWS), also die Gesamtheit von Wasser auf und unter der Erdoberfläche, direkt messen kann. TWS wurde kürzlich vom GCOS als neue ECV deklariert.

Das vom AIUB mit-initiierte und vom GFZ koordinierte Horizon 2020 Projekt Global Gravity-based Groundwater Product G3P (<https://www.g3p.eu>) hat zum Ziel, Grundwasservorkommen und deren Variationen global und mit monatlicher zeitlicher Auflösung zu charakterisieren und einen Prototypen zur Generierung eines globalen Produkts für Grundwasser zu erstellen. Die Idee: GRACE/GRACE-FO liefert über Schwerefeldmodelle den Total Water Storage (Abb. 11). Werden davon die beobachtbaren Anteile von Gletschern, Schnee, Bodenfeuchte und Oberflächenwasser abgezogen, kann auf das Grundwasser geschlossen werden. G3P nutzt dazu verschiedene Copernicus-Dienste (Abb. 3) und das Grundwasserprodukt soll am Ende in den "Climate change"-Dienst einfließen.

## Kontakt

Adrian Jäggi, Daniel Arnold  
Astronomisches Institut der Universität Bern  
Sidlerstrasse 5  
CH-3012 Bern  
daniel.arnold@aiub.unibe.ch

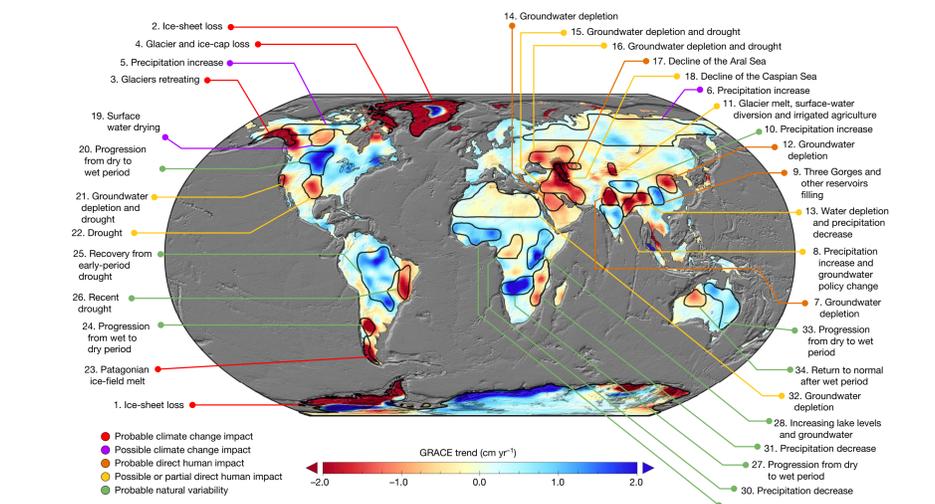


Abbildung 9: Geophysikalische Trends, welche mit GRACE zwischen 2002 und 2016 gemessen werden konnten. Rot kennzeichnet Gebiete mit Massenverlust, z.B. durch Eisschmelze oder Dürre. Blau markiert sind Gebiete mit Massenzuwachs, z.B. durch erhöhten Niederschlag oder Bauten wie Staudämme. Aus Rodell et al., (2018).

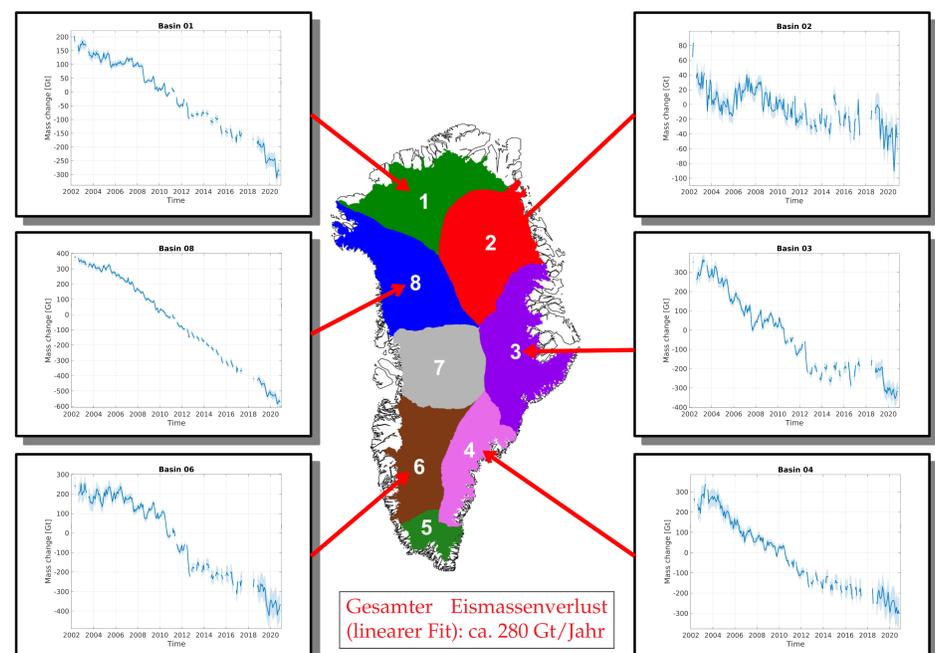


Abbildung 10: Aus COST-G Produkten ermittelter Eismassenverlust auf Grönland. Zwischen 2002 und 2020 beläuft sich der gesamte jährliche Verlust in Grönland auf etwa 280 Gigatonnen, das sind etwa 10'000 Eiswürfel mit 1 m Kantenlänge pro Sekunde.