

Globale Massenverteilungen aus Satellitengravimetrie: Das interaktive Datenportal GravIS

Eva Börgens, Christoph Dahle, Henryk Dobsław, Andreas Groh,
Ingo Sasgen, Sven Reißland und Frank Flechtner

Zusammenfassung

Über das vom GFZ Potsdam betriebene Datenportal »Gravity Information Service« (GravIS, gravis.gfz-potsdam.de) werden vorprozessierte Daten der Satellitenmissionen GRACE und GRACE Follow-On (GRACE-FO) bereitgestellt. Die verfügbaren Datensätze umfassen Massenanomalien der Eisschilde Grönlands und der Antarktis, terrestrische Wasserspeicheränderungen sowie ozeanische Bodendruckvariationen, aus denen der masseninduzierte Meeresspiegelanstieg abgeleitet werden kann. Dabei werden die Daten dem Nutzer sowohl regelmäßig gegittert als auch für ausgewählte Regionen als Gebietsmittelwerte zur Verfügung gestellt. Der Nutzer kann sich räumliche und zeitliche Veränderungen sowohl global als auch regional interaktiv anzeigen lassen. Das Portal richtet sich an Anwender aus der Hydrologie, Ozeanographie und Kryosphäre, aber auch an die populärwissenschaftlich interessierte Öffentlichkeit. Alle zugrunde liegenden Daten stehen dem Nutzer auch zum Download für weitere Auswertungen zur Verfügung.

Summary

The data portal »Gravity Information Service« (GravIS, gravis.gfz-potsdam.de) developed and maintained by GFZ provides preprocessed data of the GRACE and GRACE-FO satellite missions. These data-sets include mass changes of the ice sheets in Greenland and Antarctica, terrestrial water storage anomalies, and ocean bottom pressure from which the global-mean barystatic sea level rise can be estimated. All data-sets are provided to the user both as regularly gridded estimates and as mean time series for selected regions. The portal aims to provide data to researchers from hydrology, cryosphere, and oceanography as well as to the interested public. Spatial and temporal variations can be interactively displayed, both regionally and globally, and the underlying data can be downloaded for further research.

Schlüsselwörter: GRACE und GRACE-FO Satellitenmissionen, Datenportal, Terrestrische Wasserspeicherung, Ozeanbodendruck, Eismassenänderung

1 Einleitung

Die Satellitenmissionen Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE, 2002–2017) und GRACE Follow-On (GRACE-FO, seit 2018) vermessen global das räumlich und zeitlich variable Erdschwerefeld. Diese Variationen werden von ungleichmäßiger Dichte- bzw. Massenvertei-

lungen im Erdinnern und Massentransporten an der Erdoberfläche verursacht. Die Daten der Missionen können daher genutzt werden, um insbesondere Wassermassenverlagerungen zu beobachten und daraus Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden geophysikalischen Prozesse zu ziehen. Beide Schwerefeldmissionen leisten damit einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis von Wasserspeicheränderungen durch den Klimawandel (Tapley et al. 2019).

Über den Kontinenten lassen sich mit GRACE und GRACE-FO beispielsweise jahreszeitliche Variationen des terrestrisch gespeicherten Wassers beobachten, welches insbesondere Oberflächengewässer, Schnee und Bodenfeuchte umfasst (Giroto and Rodell 2019). Darüber hinaus kann aufgrund der langen Zeitreihe von mittlerweile fast 20 Jahren auch eine Grundwasserabnahme wie etwa in Nordindien beobachtet werden (Chen et al. 2016). Auch hydrometeorologische Extremereignisse wie Dürren (Boergens et al. 2020, Zhao et al. 2017) und Überschwemmungen (Chen et al. 2010, Gouweleeuw et al. 2018) sind mittels Satellitengravimetrie aus einer neuen Perspektive beobachtbar. Mit der Satellitengravimetrie lässt sich der komplette Wasserspeicher, inklusive des Grundwassers, großräumig beobachten, während herkömmliche Beobachtungen von beispielsweise Niederschlag oder Bodenfeuchte zwar räumlich besser aufgelöst sind, aber Änderungen im Grundwasser nicht erfassen können.

Seit 2002 kann mit GRACE und GRACE-FO weiterhin der Eismassenverlust in Grönland, der Antarktis (Groh et al. 2019, Velicogna et al. 2020) und verschiedenen vergletscherten Bergregionen (Wouters et al. 2019) quantifiziert werden.

Der Wassermasseneintrag in die Ozeane lässt sich ebenfalls mit GRACE und GRACE-FO beobachten, woraus der daraus resultierende barystatische Anteil des Meeresspiegelanstieges bestimmt werden kann (Chen et al. 2019).

Daneben können mit den Schwerefelddaten verschiedene Phänomene der allgemeinen Zirkulation im Welt-ozean untersucht werden (Johnson and Chambers 2013, Peralta-Ferriz et al. 2014).

Insgesamt sind bislang über 2000 wissenschaftliche Publikationen erschienen¹, die GRACE und GRACE-FO Daten nutzen. Die wichtigsten Ergebnisse wurden in Tapley et al. (2019) sowie Landerer et al. (2020) zusammengefasst.

¹ www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/op/grace/references/sort_date.html

Um die GRACE und GRACE-FO Daten auch für Wissenschaftler anderer geowissenschaftlicher Teildisziplinen wie Hydrologie, Ozeanographie oder Kryosphäre, oder für die wissenschaftlich interessierte Öffentlichkeit besser zugänglich zu machen, stellt das Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) über das Portal »Gravity Information Service« (GravIS) aufbereitete Produkte für die verschiedenen zuvor erwähnten Massentransportprozesse zur Verfügung. Für einen einfachen Zugang kann der Nutzer die Daten interaktiv im Portal auswählen und betrachten. Für eine tiefer- oder weitergehende Datenanalyse können diese auch heruntergeladen werden. Das Portal und die darin enthaltenen Daten werden zusammen mit drei Anwendungsbeispielen in diesem Artikel vorgestellt.

2 Die GRACE und GRACE Follow-On Satellitenmissionen

Die Zwillingssatellitenmission GRACE wurde im März 2002 gestartet und vermaß bis Juni 2017 das Erdschwerefeld und dessen zeitliche Variationen (Tapley et al. 2004). Seit Mai 2018 werden diese Messungen nun durch die Nachfolgemission GRACE-FO mit einer geplanten Lebenszeit von fünf Jahren (Kornfeld et al. 2019) fortgeführt. Sowohl bei GRACE als auch GRACE-FO handelt es sich um deutsch-amerikanische Gemeinschaftsprojekte.

Die Missionen bestehen jeweils aus zwei baugleichen Satelliten, die einander im gleichen Orbit von ca. 490 km Anfangsflughöhe mit einem Abstand von ungefähr 220 km folgen. Dabei wird kontinuierlich der Abstand zwischen den beiden Satelliten gemessen und die Position und Orientierung der Satelliten mittels GPS-Empfängern, Sternkameras und Inertialsensoren (nur GRACE-FO) bestimmt. Sowohl GRACE als auch GRACE-FO sind mit einem Mikrowellendistanzmesser ausgestattet, der Änderungen des Satellitenabstandes auf wenige tausendstel Millimeter genau messen kann. Zusätzlich misst auf GRACE-FO ein Laser Ranging Interferometer als Technologie-Demonstrator die Distanz noch einmal etwa dreißigmal genauer (Abich et al. 2015, Landerer et al. 2020).

Die ungleichmäßige Dichteverteilung im Erdinneren verursacht ein räumlich variables Erdschwerefeld. Nähert sich das Satellitenpaar beispielsweise einer positiven Schwereanomalie, so wird zuerst der vordere Satellit beschleunigt, wodurch sich der Abstand zwischen den beiden vergrößert. Aus Daten von mehreren Umläufen der Satelliten kann aus diesen gemessenen Distanzveränderungen auf das räumlich variable Schwerefeld rückgeschlossen werden. Allerdings beeinflussen auch Restatmosphäre und Sonneneinstrahlung die individuellen Bahnen der Satelliten, weshalb diese Einflüsse mittels hochpräziser Beschleunigungsmesser erfasst und bei der Schwerefeldprozessierung berücksichtigt werden.

Aus den gemessenen Daten wird üblicherweise ein über 30 Tage gemitteltes globales Erdschwerefeld berechnet, womit durch den Vergleich von verschiedenen Monatslösungen auch zeitliche Variationen untersucht werden können. Derartige Variationen werden durch die bereits erwähnten Wasser- und Eismassenverlagerungen auf Land und in den Ozeanen verursacht. Aber auch Massenänderungen in Erdkruste und Mantel, wie z.B. ko- und postseismische Deformationen durch starke Erdbeben oder die postglaziale Landhebung (GIA) werden von GRACE und GRACE-FO erfasst.

Für die Prozessierung der zeitvariablen Schwerefelder werden zunächst die Rohdaten der einzelnen Instrumente vorprozessiert (Synchronisierung der Zeitstempel, Anpassung der Sampling-Raten, ggfs. Filterung der Daten). Aus diesen sogenannten Level-1B Produkten werden dann Schwerefeldmodelle erzeugt, was in der Regel durch eine gemeinsame Schätzung von Satellitenbahnen, Erdschwerefeld, Instrumentenparametern sowie sonstigen (empirischen) Parametern mittels Kleinste-Quadrate-Ausgleichung erfolgt (z.B. Dahle et al. 2019b). Die Schwerefeldmodelle werden üblicherweise in Form von sphärisch-harmonischen Koeffizienten, auch bezeichnet als Stokes-Koeffizienten, routinemäßig durch drei offizielle Analysezentren berechnet und einem weltweiten Nutzerkreis als sogenannte Level-2 Produkte zur Verfügung gestellt. Neben dem GFZ in Potsdam sind dies das Jet Propulsion Laboratory (JPL – Pasadena, Kalifornien) und das Center for Space Research (CSR – Austin, Texas) in den USA. Daneben gibt es weitere Gruppen, die ebenfalls monatliche GRACE und GRACE-FO Schwerefelder prozessieren, wie z.B. das Institut für Geodäsie an der TU Graz. Darüber hinaus werden an der Universität Bern im Rahmen des IAG-Services »International Combination Service for Time-variable Gravity Fields (COST-G)« monatliche Schwerefeldlösungen verschiedener Gruppen zu einem gemeinsamen Level-2 Produkt kombiniert, wobei durch die Kombination unter Berücksichtigung stochastischer Eigenschaften der einzelnen Lösungen ein verbessertes Signal-zu-Rausch-Verhältnis der kombinierten Lösung resultiert (Jäggi et al. 2020).

3 Das GravIS-Portal

Die unmittelbare Nutzung von GRACE/GRACE-FO Level-2 Produkten für geophysikalische Anwendungen erfordert fundierte Kenntnisse in physikalischer Geodäsie. Um den Kreis potenzieller Nutzer zu erweitern, wären zusätzliche anwenderfreundliche Produkte für Nicht-Geodäten wünschenswert. Über das GravIS-Portal (gravis.gfz-potsdam.de) werden solche sogenannten Level-3 Produkte bereitgestellt. Dies sind zum einen gegitterte Felder und zum anderen regionale oder globale Zeitreihen. GravIS bietet dabei zwei Varianten basierend auf unterschiedlichen Level-2 Produkten an: Die erste

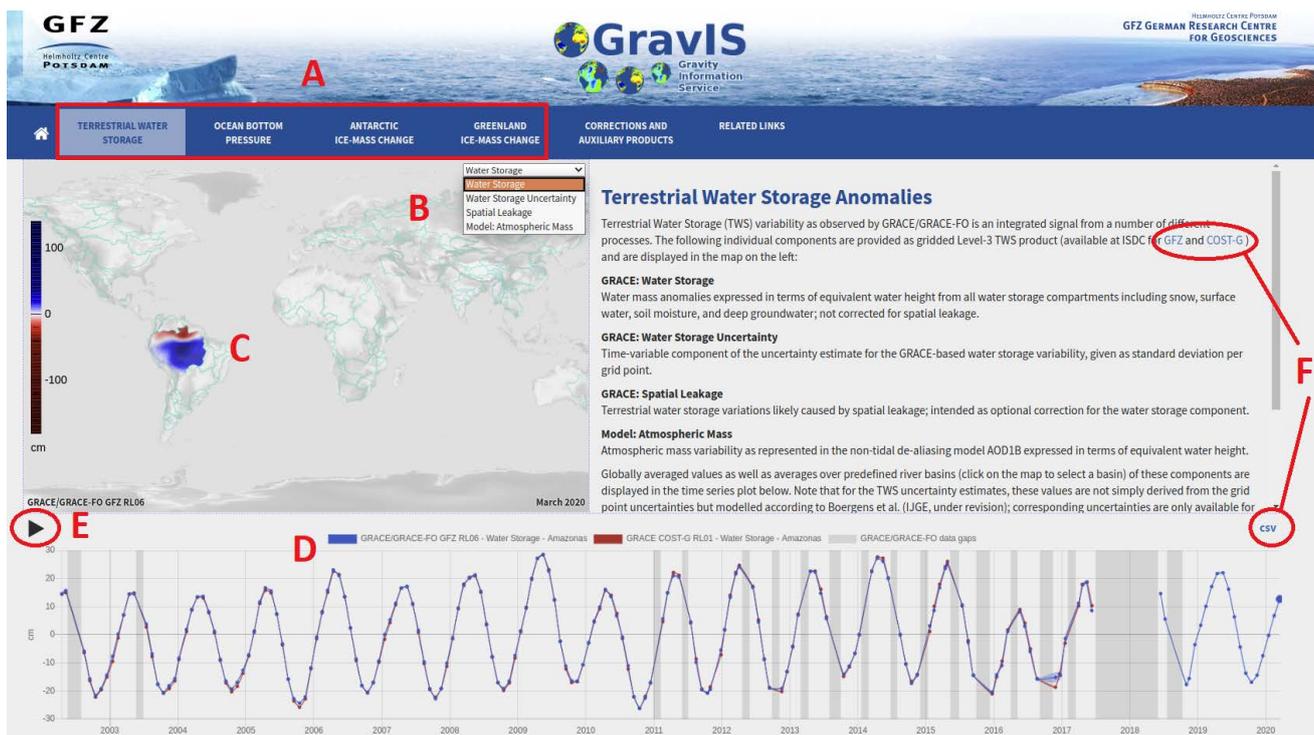


Abb. 1: Beispiel aus GravIS zu Terrestrial Water Storage. In der oberen Leiste (A) kann zwischen den verschiedenen Produkten ausgewählt werden. Je nach Produkt können in der Kartendarstellung verschiedene Layer ausgewählt werden (B). Zusätzlich lassen sich auf der Karte bestimmte Regionen auswählen (C). Der Gebietsmittelwert für den ausgewählten Layer und die Region wird als Zeitreihe dargestellt (D). Die zeitlichen Variationen der gegitterten Daten können als Animation abgespielt werden (E). Für die gegitterten Daten und die Gebietszeitreihen gibt es zwei getrennte Download-Links (F).

basiert auf der GFZ RL06 Zeitreihe (Dahle et al. 2018, 2019a), die zweite auf der COST-G RL01 Zeitreihe (Meyer et al. 2020). In einem ersten Schritt werden zunächst diverse Korrekturen an die Stokes-Koeffizienten dieser Level-2 Produkte angebracht, u. a. räumliche Filterung zur optimalen Trennung von Signal und Rauschen, Ersetzen bestimmter mit GRACE/GRACE-FO nicht oder nur schlecht schätzbarer Schwerefeldkoeffizienten niederen Grades, Abziehen eines GIA-Modells (weitere Details zu den angebrachten Korrekturen finden sich unter <http://gravis.gfz-potsdam.de/corrections>). Diese korrigierten Stokes-Koeffizienten werden als sogenannte Level-2B Produkte ebenfalls über GravIS angeboten und dienen im zweiten Schritt als Grundlage für die Erzeugung der Level-3 Produkte.

Bei GravIS wird hierbei zwischen den Domänen Grönland, Antarktis, nichtvergletschertes Land und Ozean unterschieden. Über den kontinentalen Landflächen wird »Terrestrial Water Storage« (TWS, dt. terrestrische Wasserspeicheränderungen) angeboten, während für die Ozeangebiete »Ocean Bottom Pressure« (OBP, dt. Ozeanbodendruck) bereitgestellt wird. Über den Eisschilden von Grönland (GIS) und der Antarktis (AIS) wird schlussendlich »Ice-Mass Change« (dt. Eismassenänderung) abgegeben.

Alle im Portal dargestellten Daten können interaktiv betrachtet und heruntergeladen werden. Dabei kann der Nutzer zwischen TWS, OBP, AIS und GIS auswählen und

sich dort teilweise (bei TWS und OBP) auch verschiedene Layer anzeigen lassen (siehe Abb. 1). Die Zeitreihen lassen sich jeweils als Animation abspielen. Die gegitterten Daten stehen zum Download als NetCDF-Dateien bereit, die Einzugsgebiet-Mittelwert-Zeitreihen als csv-Dateien. Zusätzlich gibt es die Zeitreihendaten für AIS und GIS auch als ASCII-Dateien.

Im Folgenden werden mehr Informationen zu den Prozessierungsschritten der verschiedenen Level-3 Produkte beschrieben und jeweils an einem Anwendungsbeispiel präsentiert.

3.1 Terrestrische Wasserspeicherung

Über den eisfreien Kontinenten wird die zeitliche Veränderung des Erdschwerefeldes als Anomalie der terrestrischen Wassermassen interpretiert. Grundlage sind zwei Varianten von Level-2B Stokes-Koeffizienten, die mit unterschiedlich starken Filtern, VDK3 und VDK5 (Horvath et al. 2018), gefiltert wurden. Diese Koeffizienten werden mittels der sphärisch-harmonischen Synthese auf ein globales 1° Gitter umgewandelt und als Schwerefeldfunktional der äquivalenten Wasserhöhe (*ewh*) dargestellt.

Aus beiden Feldern werden die deterministischen Signale Trend, Jahres- und Halbjahressignal geschätzt. Die verbleibenden residualen Signale beinhalten zwischen-

monatliche und langzeitliche Variationen. Da die saisonalen Signale ein niedrigeres Rauschniveau haben, werden die deterministischen Signale aus dem schwächer gefilterten VDK5-Feld mit den residualen Signalen des VDK3-Feldes kombiniert. Zusätzlich werden ko- und postseismische Deformation der drei Starkbebenereignisse Sumatra-Andaman 2004, Chile 2010 und Tohoku-Oki 2011 korrigiert.

Neben den globalen gegitterten Daten können für einhundert Einzugsgebiete großer Flüsse gemittelte Zeitreihen betrachtet und heruntergeladen werden. Die TWS-Daten werden dabei um eine Fehlerabschätzung für die gemittelten Flussbeckenzeitreihen, eine räumliche Leakage-Korrektur und das zuvor abgezogene atmosphärische Hintergrundmodell ergänzt.

3.1.1 Beispiel: Dürre in Mitteleuropa

Ein typisches Anwendungsbeispiel für TWS-Daten der Satellitengravimetrie ist die Quantifizierung von Wassermangel aufgrund von Dürren. Dies wird hier gezeigt anhand der mitteleuropäischen Dürre der Jahre 2018 und 2019 (European Drought Observatory 2018, 2019). Dürre beschreibt hier den Zustand des Wassermangels im Vergleich zu einem Normalzustand, der von der Jahreszeit abhängt. Damit kann beispielsweise während einer Winterdürre mehr Wasser im Wasserspeicher vorhanden sein als während eines normalen Sommers.

Der Wasserspeicher in Mitteleuropa weist eine starke jahreszeitliche Variation auf, mit dem Minimum im

Hochsommer (August) und dem Maximum im Winter (Februar). Diese jährliche Variation wurde für die Darstellung in Abb. 2 reduziert, um den Mangel bzw. Überschuss im Wasserspeicher besser sichtbar zu machen. Diese Daten können nun auf einer Karte dargestellt werden, um räumliche Muster der Dürre in den Monaten von 2018 und 2019 darzustellen, die jeweils das größte Wassermassendefizit haben (Abb. 2a und 2b). Daneben kann das mittlere residuale TWS-Signal als Zeitreihe betrachtet werden (Abb. 2c, linke Skala). Damit lassen sich die Dürren in 2018 und 2019 mit früheren Trockenperioden aus dem Beobachtungszeitraum wie 2003 oder 2015 vergleichen. Die angegebene Einheit des Funktionals ewh in Zentimeter kann mit der Formel (1) in Gigatonnen Wassermasse (m) in einem Gebiet umgerechnet werden:

$$m[\text{Gt}] = \sum_i ewh_i [\text{cm}] \cdot a_i [\text{km}^2] \cdot \rho_w \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 10^{-8} \quad (1)$$

a_i ist dabei die Fläche des Gitterpunktes und ρ_w die Dichte von Wasser (Abb. 2c, rechte Skala). Die in dieser Zeitreihe bereits reduzierte mittlere saisonale Variation zwischen August und Februar beträgt 154 Gt.

Insgesamt zeigt sich mit dem bereitgestellten Datensatz, dass die Dürren in 2018 und 2019 die trockensten Phasen über die gesamte Dauer der bisherigen GRACE/GRACE-FO Zeitreihe in Mitteleuropa darstellen. Die genaue Quantifizierung des Wasserdefizits hängt von der gewählten Prozessierungsstrategie ab, was allerdings

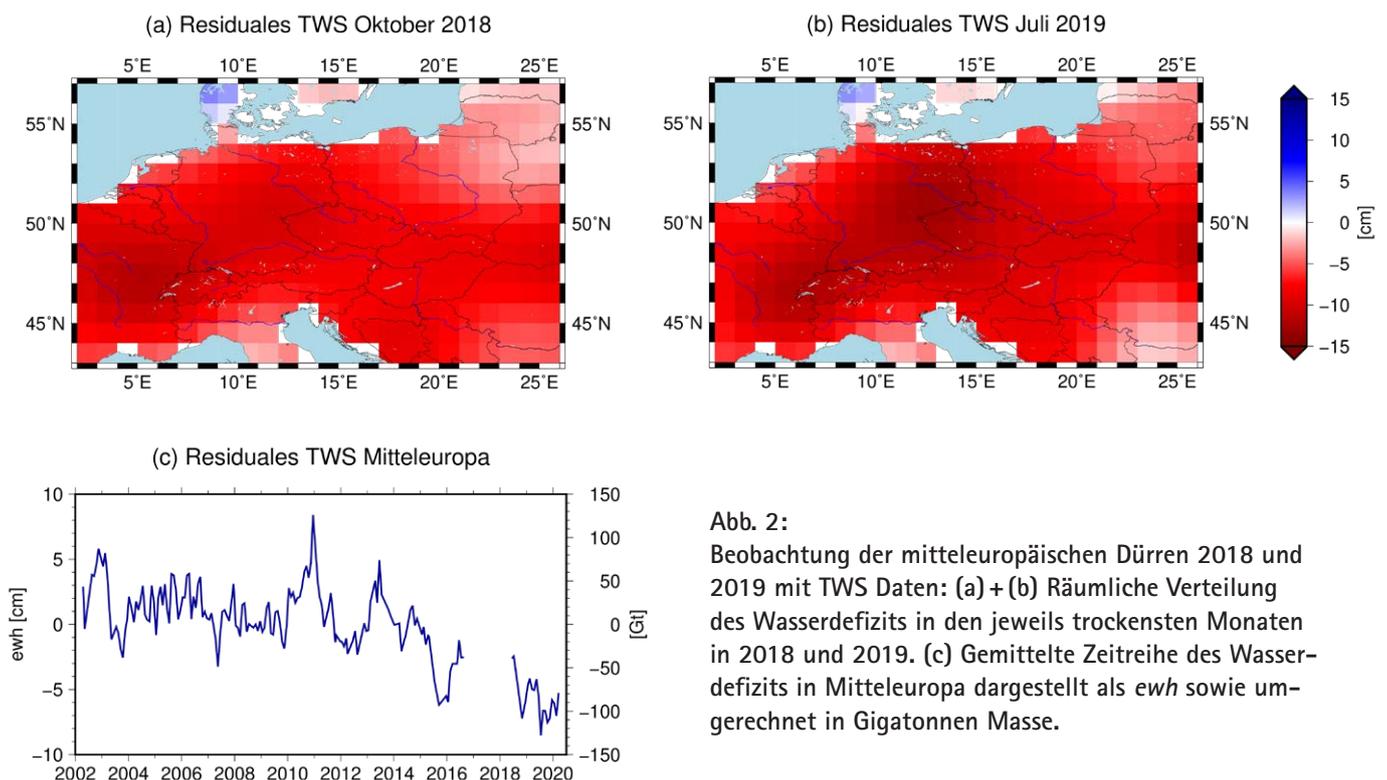


Abb. 2: Beobachtung der mitteleuropäischen Dürren 2018 und 2019 mit TWS Daten: (a) + (b) Räumliche Verteilung des Wasserdefizits in den jeweils trockensten Monaten in 2018 und 2019. (c) Gemittelte Zeitreihe des Wasserdefizits in Mitteleuropa dargestellt als ewh sowie umgerechnet in Gigatonnen Masse.

nichts an der Klassifizierung der Jahre 2018 und 2019 als trockenste Jahre ändert. Ein detaillierter Vergleich sowohl zu weiteren GRACE-Datensätzen als auch externen Dürreindikatoren kann in Börgens et al. (2020) nachgelesen werden.

3.2 Eismassenänderung

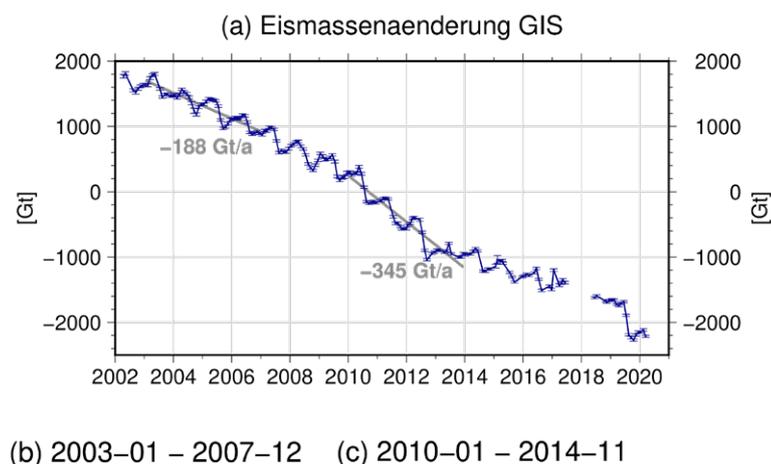
Gitterprodukte für den Antarktischen und Grönländischen Eisschild werden mittels maßgeschneiderter Sensitivitätskerne erzeugt (Groh and Horwath 2016), die für jede Gitterzelle eines polar-stereographischen Gitters mit einer räumlichen Auflösung von $50 \times 50 \text{ km}^2$ generiert werden. Diese werden als Integrationskerne im Sinne einer regionalen Integration (Swenson and Wahr 2002) auf ungefilterte Level-2B Produkte angewendet. Dabei realisiert jeder Integrationskern einen Kompromiss folgender gegensätzlicher Bedingungen, welche die Minimierung von Leakage-Effekten (I + II) und die Minimierung von fortgepflanzten Unsicherheiten der

Schwerefeldlösungen (III) zum Ziel haben: I. Massenänderungen innerhalb einer Zelle sollen möglichst genau reproduziert werden, II. Massenänderungen außerhalb einer Zelle sollen einen möglichst geringen Einfluss auf die Massenschätzung der Zelle haben und III. der Einfluss von Unsicherheiten der GRACE/GRACE-FO-Schwerefeldlösungen soll minimal sein.

Für die Fortpflanzung der GRACE/GRACE-FO-Fehler-effekte ist ein Varianz-Kovarianz-Modell der monatlichen Level-2B Produkte erforderlich, das empirisch aus den kurzzeitigen Variationen der Monatslösungen abgeleitet wird. Die gegenseitige Gewichtung der unterschiedlichen Bedingungen wird aufgrund der Leakage-Effekt-Fehler und des Rauschniveaus (Groh et al. 2019) der Massenänderungszeitreihen bestimmt.

Einzugsgebietsprodukte beschreiben die Massenänderungen in sieben bzw. fünfundzwanzig glaziologischen Einzugsgebieten des Grönländischen und Antarktischen Eisschildes. Die Massenzeitreihen basieren auf der Inversion der Schwerefelder mit einem Vorwärtsmodellierungsansatz, in den Vorinformationen über die räumliche Verteilung von Massenanomalien durch Schneefall, Schmelzen und Eisausstoß eingehen (Sasgen et al. 2012, 2013). Die mitgelieferten Fehler der Monatswerte sind empirisch aus den Residuen der Zeitreihen geschätzt, nach Abzug linearer Trends, jährlicher- und halbjährlicher Variationen, sowie zeitlicher Anteile mit einer Dauer von länger als drei Monaten.

3.2.1 Beispiel: Eismassenänderungen des Grönländischen Eisschildes



(b) 2003-01 – 2007-12

(c) 2010-01 – 2014-11

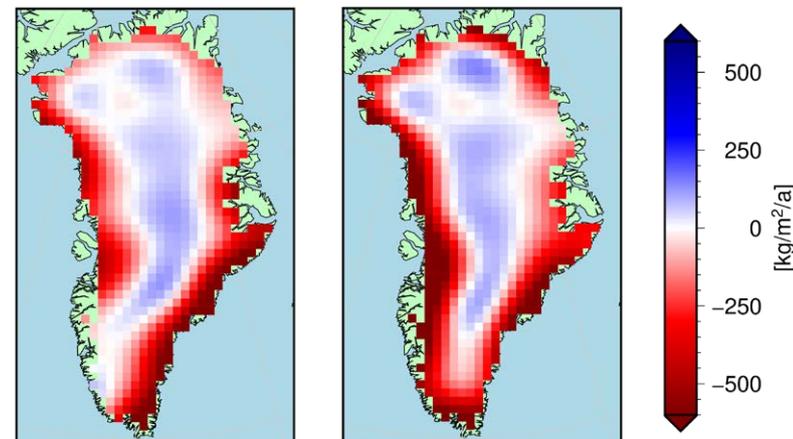


Abb. 3: (a) Massenänderung des grönländischen Eisschildes in Gigatonnen (Gt) bez. des langjährigen Mittels über den Zeitraum 2002-04 bis 2020-03 und lineare Trends für zwei Fünfjahres-Zeiträume, 2003-01 bis 2007-12 und 2010-01 bis 2014-11 (in grau). (b) + (c) Räumliche Muster der linearen Massenänderungen während der beiden Fünfjahres-Zeiträume.

Die auf dem Portal bereitgestellten Einzugsgebietsprodukte für den Grönländischen Eisschild erlauben die Quantifizierung zeitlicher Änderungen der Eismasse für unterschiedliche Eiseinzugsgebiete und den gesamten Eisschild. So hat die Masse des gesamten Grönländischen Eisschildes zu Beginn der GRACE-Periode, im Fünfjahres-Zeitraum von 2003 bis 2007, im Mittel um 188 ± 14 Gigatonnen pro Jahr (Gt/a) abgenommen (Abb. 3a). Dies entspricht einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels von $0,52 \pm 0,04$ mm/a. Dabei sind die Trends um die Massenänderung durch die glazialisostatische Ausgleichsbewegung der festen Erde korrigiert worden. Für Grönland und das verwendete Modell ICE-6G_D (Peltier et al. 2018) beläuft sich diese Korrektur auf -10 Gt/a. Im Zeitraum von 2010 bis 2014 hat sich die Abnahme auf 345 ± 15 Gt/a erhöht und damit fast verdoppelt. In diese Periode fällt auch der Rekordsommer im

Jahr 2012, in dem der Grönländische Eisschild zwischen Juni und September allein mehr als 600 Gt an Masse verloren hat. Die Analyse der gegitterten Level-3 Produkte lässt erkennen, dass die großen Massenverluste im zweiten Fünfjahres-Zeitraum ihren Ursprung hauptsächlich in den Küstenregionen Westgrönlands sowie im Nordosten des Eisschildes haben (Abb. 3b und 3c).

Über den gesamten GRACE und GRACE-FO Zeitraum (2002-04 bis 2020-03) verlor der Grönländische Eisschild im Mittel 231 ± 14 Gt/a an Masse, was einem mittleren Meeresspiegelanstieg von $0,65 \pm 0,04$ mm/a entspricht. Andere Prozessierungsstrategien der GRACE und GRACE-FO Daten können zu leicht unterschiedlichen Zahlen führen. Sowohl in Jäggi et al. (2020) als auch Velicogna et al. (2020) werden die hier präsentierten Ergebnisse mit anderen Datensätzen verglichen.

3.3 Ozeanbodendruck

Wassermassen werden sowohl zwischen Ozean und Land als auch innerhalb der Ozeanbecken kontinuierlich umverteilt. Die Konsequenzen aller involvierten dynamischen Prozesse können direkt mit GRACE und GRACE-FO beobachtet werden. Analog zur Prozessierung der TWS-Daten werden wieder zwei Varianten der Level-2B Stokes-Koeffizienten genutzt, hier allerdings gefiltert mit VDK2 und VDK5. Diese gefilterten Daten werden mittels der sphärisch-harmonischen Synthese auf ein 1° -Gitter

entwickelt und als Druckanomalien dargestellt. Von diesen Feldern werden jeweils Trend, Jahres- und das Halbjahressignal abgetrennt. Im Ozean ist das dominante Signal der Trend, weshalb für das OBP-Produkt der Trend des VDK5-Feldes mit dem Jahres- und Halbjahressignal sowie dem residualen Signal des VDK2-Feldes kombiniert wird. Auch für dieses Produkt werden Signale von starken Erdbeben und der postglazialen Landhebung mit Hilfe von zusätzlichen Modell- und Beobachtungsdaten korrigiert.

Im GravIS-Portal können neben dem gesamten Ozeangebiet auch OBP-Variationen einzelner Ozeanbecken angezeigt werden. Hinsichtlich der OBP-Signale wird unterschieden zwischen barystatischen Meeresspiegelvariationen sowie Signalen der insbesondere windgetriebenen Ozeanzirkulation. Auch für diese Produkte werden wieder Genauigkeitsabschätzungen bereitgestellt. Weiterhin werden eine räumliche Leakage-Korrektur sowie zuvor angebrachte Hintergrundmodelle für Atmosphäre und Ozean als ergänzende Information bereitgestellt.

3.3.1 Beispiel: Saisonale und langfristige Massenvariationen der Ozeane

Mit den OBP-Daten können sowohl saisonale Wassermassenvariationen in den Ozeanen beobachtet werden, sowie auch die globale Wassermassenzunahme in den Ozeanen über die vergangenen 18 Jahre (siehe Abb. 4). Global

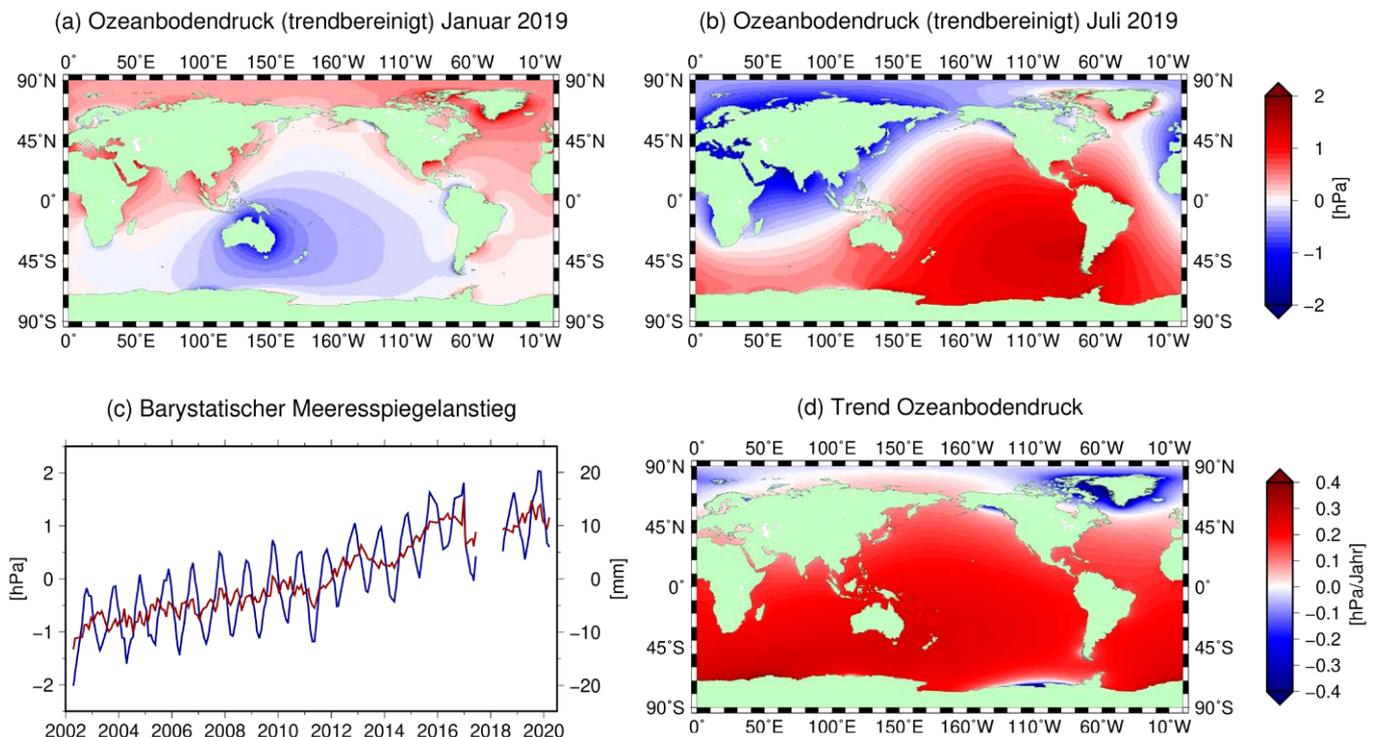


Abb. 4: Globale Ozeanbodendruckdaten: (a) + (b) Ozeanbodendruckvariationen zwischen Nord- und Südwinter. (d) Langjähriger Trend pro Gitterpunkt. (c) Globaler mittlerer Ozeanbodendruck und globaler barystatischer Meeresspiegelanstieg. Um den Trend besser zu erkennen, wurde in (c) die saisonale Variation reduziert (rot).

zeigen die OBP-Daten sowohl einen Trend als auch jahreszeitliche Variationen. Um letztere besser betrachten zu können, wird der Trend in jedem Gitterpunkt reduziert und das Ergebnis global dargestellt (Abb. 4a und 4b). Dabei erkennt man eine deutliche Massenverlagerung zwischen dem Nord- und Südwinter. Auf der anderen Seite kann man auch den Trend alleine betrachten (Abb. 4d). Der stark negative Trend entlang der grönländischen und antarktischen Küste ist durch die stetig abnehmenden Eismassen und der daraus resultierenden geringeren gravitativen Wirkung auf das Meerwasser zu erklären.

Aus den gegitterten Daten kann außerdem die mittlere globale OBP-Variation bestimmt werden. Um den langfristigen Trend besser sichtbar zu machen, wird auch hier wieder das mittlere Jahressignal reduziert (Abb. 4c, rechte Skala). In einem letzten Schritt können diese globalen Druckvariationen in den barostatischen Meeresspiegelanstieg umgerechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass dies nur der Teil des globalen Meeresspiegelanstiegs ist, der durch Massenzunahme verursacht wird, zu dem noch eine temperaturbedingte Wasserausdehnung, der sogenannte sterische Effekt, hinzukommt. Ozeanbodendruck wird mit Formel (2) in globalen Meeresspiegel (sl) umgerechnet:

$$sl[\text{mm}] = \left(\frac{\sum_i \frac{obp_i [\text{hPa}] \cdot 100 \cdot a_i [\text{km}^2]}{g_i \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \rho_w \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}}{\sum_i a_i [\text{km}^2]} \right) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Dabei ist a_i wieder die Fläche des entsprechenden Gitterpunktes und ρ_w die Dichte des Wassers; g_i ist die Schwerebeschleunigung (Abb. 4c, linke Skala). Auch bei dieser Zeitreihe ist das mittlere Jahressignal reduziert worden, um den langfristigen Trend und zwischenjährliche Variationen besser sichtbar zu machen.

4 Zusammenfassung

Das Datenportal GravIS (gravis.gfz-potsdam.de) bietet wissenschaftliche Produkte der Satellitenmissionen GRACE und GRACE-FO über Massenanomalien im Erdsystem an. Die Daten sollen insbesondere Nicht-Geodäten einen niedrigschwelligen Zugang zu den Ergebnissen dieser Satellitenmissionen eröffnen. Dabei werden jeweils individuell prozessierte Daten für die eisfreien Kontinente, Ozeane und die Eisschilde in der Antarktis und Grönland angeboten. Alle Zeitreihen und Massenverteilungen können nicht nur interaktiv betrachtet, sondern die entsprechenden Produkte auch heruntergeladen werden. Neben der Beschreibung des Portals und der darin enthaltenen Datensätze wurde in diesem Artikel anhand dreier Anwendungsbeispiele gezeigt, wie die Daten für

aktuelle Anwendungen genutzt werden können. So lässt sich die mitteleuropäische Dürre in 2018 und 2019 ebenso beobachten wie der anhaltende Eismassenverlust in Grönland und der daraus resultierende Anstieg des Meeresspiegels.

Alle Daten sind frei und ohne Anmeldung verfügbar. Die Datensätze werden regelmäßig aufdatiert, sodass auch zukünftige Entwicklungen und Ereignisse im Portal abgebildet und von Anwendern weiter untersucht werden können.

Literatur

- Abich, K., Bogan, C., Braxmaier, C., Danzmann, K., Dehne, M., Gohlke, M., Görth, A., Heinzl, G., Herding, M., Mahrtdt, C., Müller, V., Nicklaus, K., Sanjuan, J., Schütze, D., Sheard, B., Stede, G., Voss, K. (2015): GRACE-Follow On Laser Ranging Interferometer: German contribution. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 610, 012010.
- Boergens, E., Güntner, A., Dobslaw, H., Dahle, C. (2020): Quantifying the Central European Droughts in 2018 and 2019 with GRACE-Follow-On. *Geophysical Research Letters*.
- Chen, J.L., Wilson, C.R., Tapley, B.D. (2010): The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resources Research*.
- Chen, J., Famiglietti, J.S., Scanlon, B.R., Rodell, M. (2016): Groundwater Storage Changes: Present Status from GRACE Observations. *Remote Sensing and Water Resources*, Space Sciences Series of ISSI, Cazenave, A., Champollion, N., Benveniste, J., Chen, J. (eds.), Springer International Publishing, Cham, 207–227.
- Chen, J., Tapley, B., Seo, K., Wilson, C., Ries, J. (2019): Improved Quantification of Global Mean Ocean Mass Change Using GRACE Satellite Gravimetry Measurements. *Geophysical Research Letters*, 46(23), 13984–13991.
- Dahle, C., Flechtner, F., Murböck, M., Michalak, G., Neumayer, H., Abrykosov, O., Reinhold, A., König, R. (2018): GRACE Geopotential GSM Coefficients GFZ RL06. V. 6.0. GFZ Data Services.
- Dahle, C., Flechtner, F., Murböck, M., Michalak, G., Neumayer, K.H., Abrykosov, O., Reinhold, A., König, R. (2019a): GRACE-FO Geopotential GSM Coefficients GFZ RL06. V. 6.0. GFZ Data Services.
- Dahle, C., Murböck, M., Flechtner, F., Dobslaw, H., Michalak, G., Neumayer, K., Abrykosov, O., Reinhold, A., König, R., Sulzbach, R., Förste, C. (2019b): The GFZ GRACE RL06 Monthly Gravity Field Time Series: Processing Details and Quality Assessment. *Remote Sensing*, 11(18), 2116.
- European Drought Observatory (2018): Drought in central-northern europe – september 2018. JRC European Drought Observatory (EDO).
- European Drought Observatory (2019): Drought in europe – august 2019. JRC European Drought Observatory.
- Giroto, M., Rodell, M. (2019): Terrestrial water storage. *Extreme Hydroclimatic Events and Multivariate Hazards in a Changing Environment*, Elsevier, 41–64.
- Gouweleeuw, B.T., Kvas, A., Gruber, C., Gain, A.K., Mayer-Gürr, T., Flechtner, F., Güntner, A. (2018): Daily GRACE gravity field solutions track major flood events in the Ganges-Brahmaputra Delta. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2867–2880.
- Groh, A., Horwath, M. (2016): The method of tailored sensitivity kernels for GRACE mass change estimates. *Geophysical Research Abstracts*, EGU2016-12065.
- Groh, A., Horwath, M., Horvath, A., Meister, R., Sørensen, L.S., Barletta, V.R., Forsberg, R., Wouters, B., Ditmar, P., Ran, J., Klees, R., Su, X., Shang, K., Guo, J., Shum, C.K., Schrama, E., Shepherd, A. (2019): Evaluating GRACE Mass Change Time Series for the Antarctic and Greenland Ice Sheet—Methods and Results. *Geosciences*, 9(10), 415.

- Horvath, A., Murböck, M., Pail, R., Horvath, M. (2018): Decorrelation of GRACE time variable gravity field solutions using full covariance information. *Geosciences*, 8(9), 323.
- Jäggi, A., Meyer, U., Lasser, M., Jenny, B., Lopez, T., Flechtner, F., Dahle, C., Förste, C., Mayer-Gürr, T., Kvas, A., Lemoine, J.-M., Bourgogne, S., Weigelt, M., Groh, A. (2020): International Combination Service for Time-VARIABLE Gravity Fields (COST-G): Start of Operational Phase and Future Perspectives. *International Association of Geodesy Symposia*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Johnson, G. C., Chambers, D.P. (2013): Ocean bottom pressure seasonal cycles and decadal trends from GRACE Release-05: Ocean circulation implications: GRACE SEASONAL CYCLES AND DECADAL TRENDS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9), 4228–4240.
- Kornfeld, R.P., Arnold, B.W., Gross, M.A., Dahya, N.T., Klipstein, W.M., Gath, P.F., Bettadpur, S. (2019): GRACE-FO: The gravity recovery and climate experiment follow-on mission. *Journal of spacecraft and rockets*, 56(3), 931–951.
- Landerer, F.W., Flechtner, F.M., Save, H., Webb, F.H., Bandikova, T., Bertiger, W.I., Bettadpur, S.V., Byun, S., Dahle, C., Dobslaw, H., Fahnestock, E., Harvey, N., Kang, Z., Kruizinga, G.L. H., Loomis, B.D., McCullough, C., Murböck, M., Nagel, P., Paik, M., Pie, N., Poole, S., Strelakov, D., Tamisiea, M.E., Wang, F., Watkins, M.M., Wen, H.-Y., Wiese, D.N., Yuan, D.-N. (2020): Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*.
- Meyer, U., Jäggi, A., Dahle, C., Flechtner, F., Kvas, A., Behzadpour, S., Mayer-Gürr, T., Lemoine, J.-M., Bourgogne, S. (2020): International Combination Service for Time-variable Gravity Fields (COST-G) Monthly GRACE Series. V. 01. GFZ Data Services.
- Peltier, W.R., Argus, D.F., Drummond, R. (2018): Comment on 'An Assessment of the ICE-6G_C (VM5a) Glacial Isostatic Adjustment Model' by Purcell et al.: The ICE-6G_C (VM5a) GIA model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2), 2019–2028.
- Peralta-Ferriz, C., Morison, J.H., Wallace, J.M., Bonin, J.A., Zhang, J. (2014). Arctic Ocean Circulation Patterns Revealed by GRACE. *Journal of Climate*, 27(4), 1445–1468.
- Sasgen, I., Van den Broeke, M., Bamber, J.L., Rignot, E., Sørensen, L.S., Wouters, B., Martinec, Z., Velicogna, I., Simonsen, S.B. (2012): Timing and origin of recent regional ice-mass loss in Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 333–334(1), 293–303.
- Sasgen, I., Konrad, H., Ivins, E.R., Van den Broeke, M.R., Bamber, J.L., Martinec, Z., Klemann, V. (2013): Antarctic ice-mass balance 2003 to 2012: regional reanalysis of GRACE satellite gravimetry measurements with improved estimate of glacial-isostatic adjustment based on GPS uplift rates. *The Cryosphere*, 7(5), 1499–1512.
- Swenson, S., Wahr, J. (2002): Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9).
- Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C. (2004): The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results: GRACE MISSION OVERVIEW AND EARLY RESULTS. *Geophysical Research Letters*, 31(9).
- Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J.S., Landerer, F.W., Chambers, D.P., Reager, J.T., Gardner, A.S., Save, H., Ivins, E.R., Swenson, S.C., Boening, C., Dahle, C., Wiese, D.N., Dobslaw, H., Tamisiea, M.E., Velicogna, I. (2019): Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9(5), 358–369.
- Velicogna, I., Mohajerani, Y., A. G., Landerer, F., Mougino, J., Noel, B., Rignot, E., Sutterley, T., Broeke, M., Wessem, M., Wiese, D. (2020): Continuity of Ice Sheet Mass Loss in Greenland and Antarctica From the GRACE and GRACE Follow-On Missions. *Geophysical Research Letters*, 47(8), e2020GL087291.
- Wouters, B., Gardner, A.S., and Moholdt, G. (2019): Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002–2016). *Frontiers in Earth Science*, 7, 96.
- Zhao, M., A. G., Velicogna, I., Kimball, J.S. (2017): Satellite Observations of Regional Drought Severity in the Continental United States Using GRACE-Based Terrestrial Water Storage Changes. *Journal of Climate*, 30(16), 6297–6308.

Kontakt

Eva Börgens | Christoph Dahle | Henryk Dobslaw | Sven Reißland
 Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
 Department 1 Geodäsie
 Telegrafenberg, 14473 Potsdam
 eva.boergens@gfz-potsdam.de

Andreas Groh
 Technische Universität Dresden, Institut für Planetare Geodäsie

Ingo Sasgen
 Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Fachbereich Geowissenschaften, Glaziologie

Frank Flechtner
 Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
 Department 1 Geodäsie
 und
 Technische Universität Berlin
 Institut für Geodäsie und Geoinformation

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.