

Ein Wasserzähler im Weltraum

Andreas Güntner, Eva Boergens, Frank Flechtner
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Wie verändert sich der globale Wasserkreislauf? Welche Schwankungen und langfristigen Trends charakterisieren die Süßwasserressourcen in den verschiedenen Regionen der Erde? Was tragen Umweltveränderungen und die Wassernutzung durch Menschen dazu bei? Zur Beantwortung dieser Fragen stellen satellitenbasierte Beobachtungen der Variationen des Erdschwerefelds einzigartige Informationen über die Wasserspeicherung auf den Kontinenten bereit.

Das auf den Kontinenten gespeicherte Süßwasser ist die grundlegende Ressource für das Leben auf der Erde. Wasser sichert die Funktionen aller Ökosysteme unseres Planeten und dient als Trinkwasser, als Bewässerung in der Landwirtschaft, als Teil industrieller Prozesse und als Transportmittel. Wo das Wasser gespeichert ist, wieviel Wasser vorhanden ist und ob diese Wasservorkommen für die verschiedenen Segmente der Wassernutzung dann auch wirklich zugänglich und verfügbar sind, sind komplexe Fragestellungen. Für deren Beantwortung ist die kontinuierliche Beobachtung und Bemessung der Wasserspeicherung notwendig. Nicht zuletzt die Kenntnis der Veränderungen der Wasserspeicherung über die Zeit bildet eine essentielle Grundlage für die nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen.

Zeitliche und räumliche Veränderungen der Wasserspeicherung sind eine Folge der natürlichen Variabilität des Klima-

systems, der menschlichen Nutzung der Ressource Wasser und von Umweltveränderungen. Insbesondere der Klimawandel sowie Änderungen der Landbedeckung und Landnutzung verursachen Änderungen im Energie- und Wasserkreislauf der Erde und in den Wasserflüssen. Diese Veränderungen führen auch zum Auffüllen oder zur Zehrung der

kontinentalen Wasserspeicher. Die Veränderungen der Wasserspeicherung (ΔS) bilden hierbei den Gesamteffekt ab, wie er sich aus den Veränderungen der Wasserflüsse von Niederschlag (N), Verdunstung (V) und Abfluss (Q) im hydroklimatologischen System einstellt, gemäß der Wasserbilanzgleichung $\Delta S = N - V - Q$. Auf Grund dieser grund-

Kernaussagen

- Süßwasser ist eine wichtige Ressource und zugleich Teil des globalen Klimasystems. Wie viel es wo und in welchen Speicherkompartimenten gibt und wie sich das über die Zeit ändert, ist von essentieller Bedeutung für uns.
- Satellitengravimetrie ist die einzige Technologie, um die Veränderungen der terrestrischen Wasserspeicherung in ihrer Gesamtheit und großräumig beobachten zu können.
- Lange, möglichst kontinuierliche Satellitenmessreihen sind dafür eine wichtige Basis. Angepasste Datenservices für die Variablen „Wasserspeicherung“ und „Grundwasser“ werden am GFZ stetig weiterentwickelt.

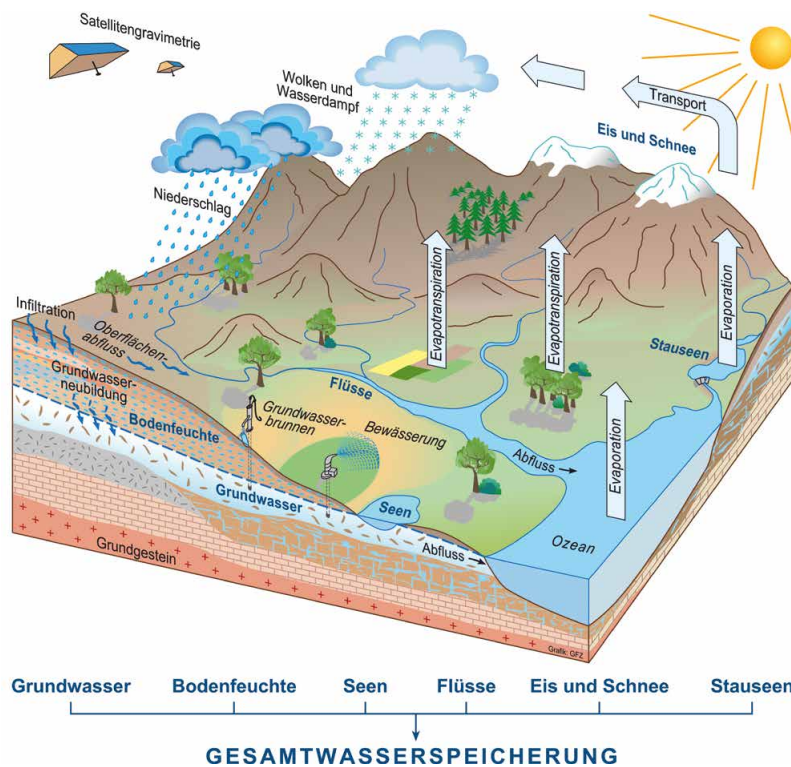


Abb. 1: Der globale Wasserkreislauf und die verschiedenen Kompartimente der Wasserspeicherung auf den Kontinenten (Grafik: GFZ)

legenden Bedeutung als Klimaindikator und ihrer Bedeutung für Rückkopplungseffekte auf das Klimasystem wurde die terrestrische Wasserspeicherung (TWS) als Essentielle Klimavariablen (siehe Infokasten rechts) definiert.

Der Verwitterungsprozess und Wasserfluss im Boden

Wenn Niederschlag auf den Boden trifft, fließt nur knapp 15 % des Wassers über die Landoberfläche ab. Über die Hälfte des Wassers verdunstet oder wird über Pflanzen transpiriert. Der Rest sickert durch Poren und Risse durch den Untergrund, bis es aus Quellen in Flüssen wieder an die Erdoberfläche gelangt (Abb. 2). 10 000 bis 30 000 km³ Wasser fließen so pro Jahr im Untergrund und kommen dabei in Kontakt mit verschiedenen Boden- und Gesteinsschichten.

Als Folge des Wasserflusses reagieren Minerale im Gestein chemisch. Salz- (z. B. Halit) und Karbonatminerale (z. B. Calcit, Dolomit) lösen sich komplett auf, während Silikatminerale (z. B. Feldspat, Biotit, Hornblende) in Tonminerale (z. B. Kaolinit, Smektit) umgewandelt werden. Ein Beispiel dafür ist die Umwandlung von Ca-Feldspat zu Kaolinit.



Infokasten: Essentielle Klimavariablen

Essentielle Klimavariablen (Essential Climate Variables, ECVs) sind physikalische, chemische oder biologische Zustandsvariablen des Erdsystems, die in zentraler Weise dazu geeignet sind, das Klima der Erde und seine Veränderungen zu charakterisieren. Die gegenwärtig 54 ECVs werden vom Global Climate Observing System (GCOS) definiert, das von der UNESCO-Weltorganisation für Meteorologie und anderen Organisationen unterstützt wird. GCOS bewertet regelmäßig globale Klimabeobachtungssysteme und erarbeitet Richtlinien für deren Verbesserung hin zu genauen, zielgerichteten, frei zugänglichen und hochwertigen Klimadatensätzen. Die Arbeiten von GCOS sind in drei thematische Fachpanels zu den terrestrischen, atmosphärischen

und ozeanischen Klimavariablen aufgeteilt. In TOPC (Terrestrial Observation Panel for Climate) sind die GFZ-Forscher Prof. Andreas Güntner und Prof. Martin Herold aktiv. Der neueste GCOS-Implementierungsplan wurde im Oktober 2022 veröffentlicht (WMO, 2022). Unter den hydrologischen ECVs wird darin neben Verdunstung, Abfluss, Bodenfeuchte, Seen und Grundwasser auch erstmals die terrestrische Wasserspeicherung (TWS) als neue ECV aufgeführt. Die dringliche Notwendigkeit von Maßnahmen zur kontinuierlichen Fortführung der Satellitengravimetrie für die Beobachtung dieser und anderer Klimavariablen (Grundwasser, Meeresspiegel, Eis- und Gletschermassen und Wassernutzung) ist im Implementierungsplan als Ziel festgelegt.



Kontakt: A. Güntner
(andreas.guentner@gfz-potsdam.de)

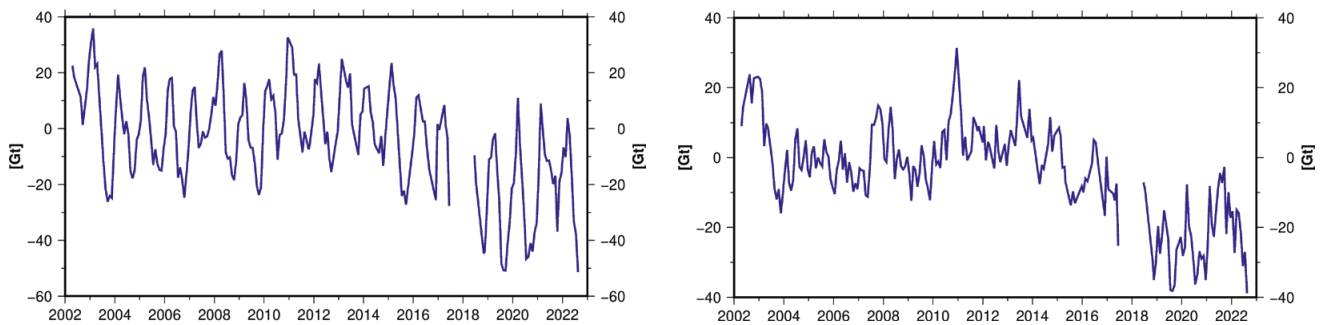


Abb. 2: Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) als Gebietsmittel für Deutschland aus GRACE und GRACE-FO, basierend auf den Level-3-Daten des GFZ, in Gigatonnen (Gt); oben: monatliche Speicheranomalien des Gesamtsignals; unten: Anomalien nach Abzug der mittleren Saisonalität.

Die Messung der TWS und ihrer Veränderungen ist jedoch eine Herausforderung, allein schon deshalb, weil Wasser in verschiedenen Speichern mit unterschiedlichen Volumina, Verweilzeiten und räumlicher Verteilung vorkommt. Die Speicherkompartimente auf den Kontinenten umfassen im Wesentlichen das Grundwasser, die ungesättigte Bodenzone, diverse Oberflächengewässer wie Flüsse und Seen, die saisonale Schneedecke, Gletscher und Eiskappen, sowie die Biosphäre (Abb. 1). Klassische bodengestützte Messverfahren, wie Pegel zur Messung des Wasserstands in Oberflächengewässern oder im Grundwasser, Bodenfeuchtemesssonden oder Schneehöhenmessungen, erschließen jeweils nur einzelne Speicherkompartimente und sind oft nur lokal im direkten Umfeld des Messgeräts gültig, sodass eine Aussage für größere Gebiete nur mit großen Unsicherheiten abzuleiten ist. Klassische fernerkundungs- bzw. satellitenbasierte Verfahren können zwar räumlich große Gebiete, aber jeweils nur die oberste Bodenschicht erfassen, sodass die tiefere Bodenfeuchte und das Grundwasser damit unzugänglich sind. Mit der Methode der Satellitengravimetrie hingegen lassen sich die Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung auf den Kontinenten umfassend abbil-

den. Das Messprinzip besteht darin, dass die räumlichen und zeitlichen Abweichungen von Satellitenbahnen von vorhergesagten theoretischen Bahnen präzise vermessen werden. Zu solchen Abweichungen kommt es aufgrund der gravitativen Wirkung von Massenunregelmäßigkeiten an oder unter der Erdoberfläche. Hierzu zählen die Veränderungen der Wasserspeicherung. Die Analyse von Bahnstörungen ermöglicht es daher, die Struktur des Erdschwerefelds in Raum und Zeit abzuleiten, und daraus dann monatliche Massenverteilungen wie die des Wasserkreislaufs zu quantifizieren (Flechtner et al., 2017). Hierfür stehen seit 2002 die Daten der Satellitenmissionen GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) und GRACE-FO (GRACE Follow-on) zur Verfügung (siehe Infokasten rechts).

Das Messprinzip der Satellitengravimetrie ermöglicht in der gegenwärtigen Konstellation eine räumliche Auflösung der Massenvariationen von etwa 300 x 300 km. Vor einer hydrologischen Interpretation der Daten werden andere Masseneffekte abgezogen. Dies geschieht mithilfe von Modellen und anderen Beobachtungen und betrifft z. B. atmosphärische und ozeanische Massenvariationen, Gezeiten und lang-

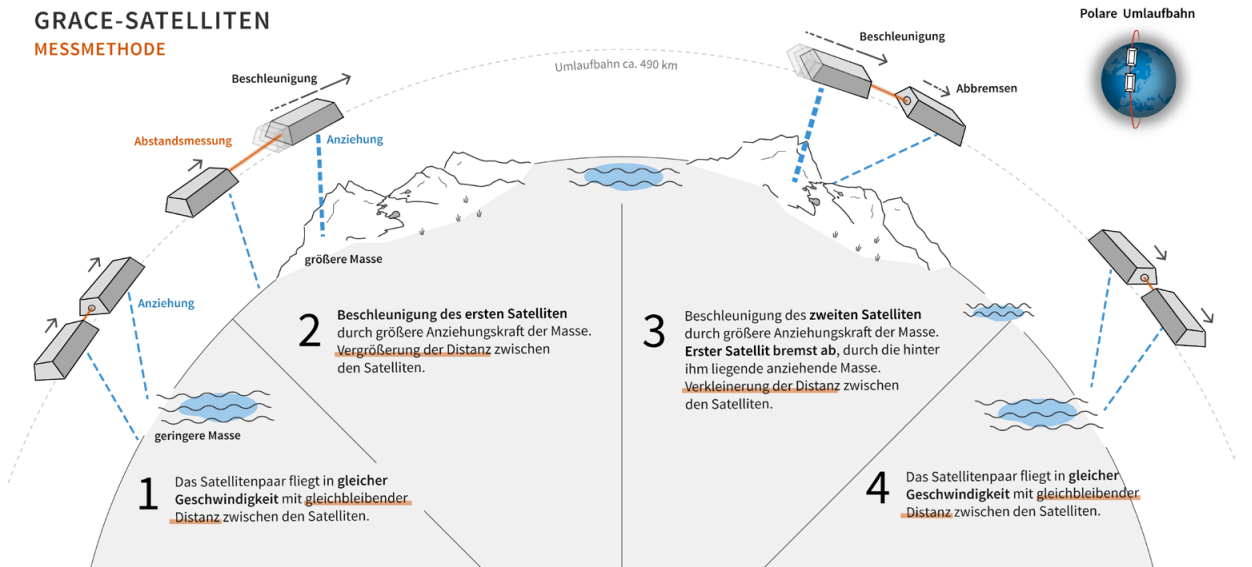
fristige Massenveränderungen aufgrund der postglazialen Landhebung. Die verbleibenden Residuen beschreiben die Veränderungen der terrestrischen Wasserspeicherung in einer integrativen Weise als Summe aller in Abb. 1 dargestellten Speicherkompartimente. Da die Satellitengravimetrie lediglich Massenveränderungen im Erdsystem beobachten kann und nicht die absolute Menge des gespeicherten Wassers, ist es üblich, die Daten als monatliche Anomalien gegenüber einem langjährigen Mittel darzustellen. Am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ wurde für die frei zugängliche Bereitstellung der Daten das operationell laufende Portal „Gravity Information System“ (GravIS) entwickelt.

Beispielhaft für die Ergebnisse von GRACE und GRACE-FO stellen wir hier die Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) in Deutschland seit 2002 dar. Die zeitliche Variabilität von TWS ist zunächst von einer deutlichen Saisonalität gekennzeichnet (Abb. 2 oben). Dieser Jahresgang beträgt rund 43 Milliarden Tonnen (Gt) Wasser. Das lässt sich umrechnen auf Wassermengen pro Fläche, die man wie bei Regen in Millimeter angibt: 43 Gt entsprechen für die Fläche von Deutschland 120 mm, also etwa 15 % des Jahresniederschlags

Infokasten: Satellitengravimetrie

GRACE-SATELLITEN

MESSMETHODE



Mit Hilfe der Satellitenmissionen GRACE (März 2002 bis Juni 2017) als Gemeinschaftsprojekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der NASA, sowie GRACE-FO (seit Mai 2018 als Gemeinschaftsprojekt des GFZ und der NASA) lassen sich Variationen im Erdschwerefeld auf monatlicher Basis vermessen. Die in einem Abstand von rund 220 km auf polaren Bahnen hintereinander fliegenden Satelliten werden, zeitlich etwas versetzt, mal stärker und mal schwächer angezogen – je nachdem, wie viel Masse (Gletscher, Gebirge, Grundwasser etc.) sich unter ihnen befindet. Dies führt zu einer kleinen Änderung des Satellitenabstands, der dank eines präzisen Mikrowellenverfahrens bis auf einige Tausendstel Millimeter genau bestimmt wird. Auf GRACE-FO wurde zusätzlich ein Laser-Ranging-Interferometer (LRI) als Technologiedemonstrator für künftige Schwerefeldmissionen realisiert. Das LRI übertrifft dabei alle ursprünglich an das Instrument gesetzten Erwartungen. Es liefert seit Einschalten kurz nach dem Start kontinuierlich Daten, dessen Messrauschen mindestens den Faktor 100 kleiner ist als bei den herkömmlichen Radar-Beobachtungen. Dies hilft, insbesondere die kleinräumigen Änderungen des Schwerefelds genauer zu bestimmen.

Um die ECV TWS und andere ECV-Zeitreihen langfristig beobachten und Prognosefähigkeiten verbessern zu können, werden aktuell Nachfolgemissionen wie GRACE-I (DLR/NASA) oder Next Generation Gravity Missions (ESA/NASA) geplant. GRACE-I soll die Kontinuität der Beobachtung des zeitvariablen Schwerefelds basierend auf LRI-Daten ab 2027 garantieren. Die Finanzierung der deutschen Missionsanteile für die Schwerefeld-Basismission wurde am 10. November 2022 vom Deutschen Bundestag zugesagt.

Etwa 2031 soll diese GRACE-FO-Nachfolgemission mit einem weiteren, technisch weiterentwickelten NGGM-Satellitenpaar (Next Generation Gravity Mission) kombiniert werden. Durch die um etwa 20 Grad gegenüber den polaren GRACE-Bahnen geneigte (inklinierte) Bahn werden dann auch West-Ost-Anteile des Schwerefelds erfasst, was eine signifikant erhöhte zeitliche und räumliche Auflösung der Massentransportbeobachtungen ermöglichen wird. Die Realisierung dieser Mass-change And Geoscience International Constellation (MAGIC) wurde von der ESA-Ratstagung auf Ministerebene am 23. November 2022 ebenfalls zugesagt.

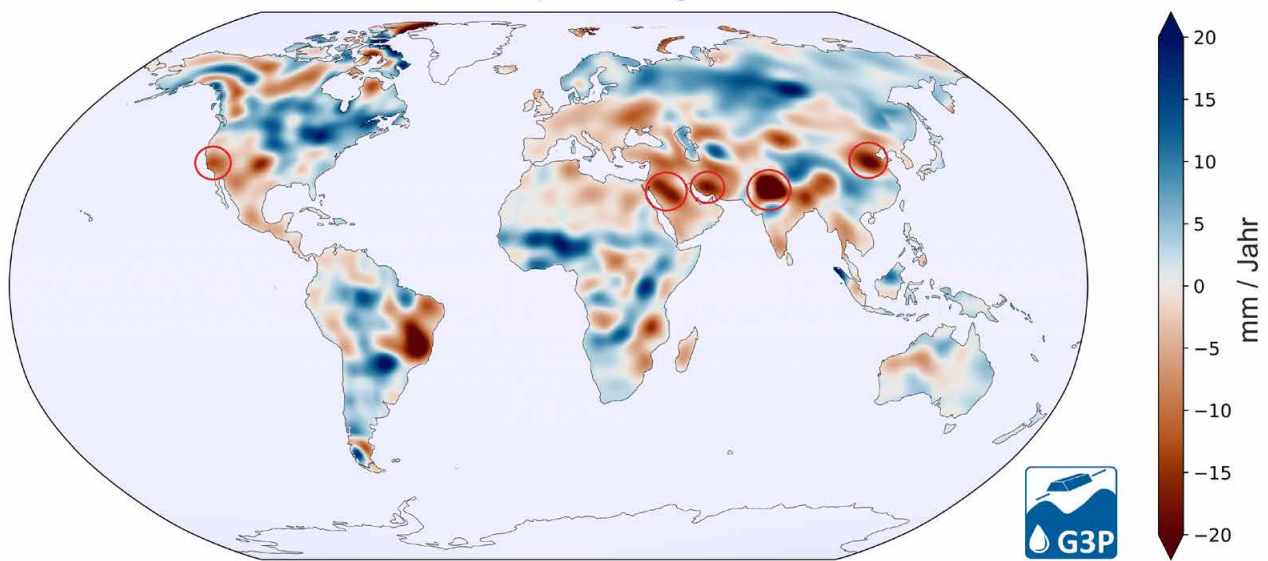


Abb. 3: Trend der Wasserspeicherung im Grundwasser basierend auf dem Datenprodukt von G3P für den Zeitraum 2002 bis 2020, ermittelt aus der Kombination von GRACE/GRACE-FO-Schwerefelddaten mit globalen Datensätzen anderer Speicherkompartimente. Rot umrandete Gebiete heben Regionen mit einer langfristigen Grundwasserzehrung durch hohe anthropogene Grundwasserentnahmen hervor.

über Deutschland (Güntner et al., 2023). Das Minimum der Wasserspeicherung tritt im Mittel am Ende des Sommers im Monat September auf, wenn durch die hohe sommerliche Verdunstung der Wassergehalt im Boden und im Grundwasser reduziert wurde. Durch die Niederschläge im Herbst und Winter bei gleichzeitig geringer Verdunstung werden die Speicher bis zu einem Maximalwert im Februar wieder aufgefüllt. Insbesondere nach Abzug dieses dominierenden Jahressignals werden Anomalien der Wasserspeicherung in Deutschland sichtbar, die durch hydro-meteorologische Extremereignisse hervorgerufen wurden. Die großen Hochwasserereignisse an Elbe und Donau im August 2002 und hohe Niederschlagsmengen bis zum Jahreswechsel Anfang 2003 führten zu stark positiven TWS-Anomalien. Der trockene Hitzesommer 2003 verursachte anschlie-

ßend eine schnelle Abnahme der Gesamtwasserspeicherung in Deutschland. Positive Anomalien treten während des schneereichen Winters 2010/11 und im Zuge der Hochwasserereignisse im Juni 2013 hervor. Seit 2015 wird von GRACE/GRACE-FO ein Rückgang von TWS in Deutschland beobachtet, deutlich verstärkt durch die Trockenjahre mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen ab 2018 (siehe auch Boergens et al., 2020). Die niedrigsten Werte der Wasserspeicherung in Deutschland stellten sich in den Sommern 2019 und 2022 ein. Insgesamt ist ein negativer Trend von TWS für den Beobachtungszeitraum zu erkennen, der im Mittel $-1,3 \text{ Gt}/\text{Jahr}$ beträgt. Es ist allerdings zu beachten, dass dieser Trendwert statistisch stark von den positiven bzw. negativen Extremjahren zu Beginn bzw. zum Ende der Beobachtungsperiode beeinflusst und somit nicht

repräsentativ für die langfristige Entwicklung über die Beobachtungsperiode hinaus betrachtet werden kann.

Angesichts der herausragenden globalen Bedeutung des Grundwassers für die Süßwasserversorgung der Menschheit und der Ökosysteme, seiner Bedeutung als Essentielle Klimavariablen, aber auch der einzigartigen Möglichkeit, mit Satellitengravimetrie diese unterirdische Ressource zu messen, sind die Entwicklung entsprechender schwerebasierter Grundwasser-Datenservices ein wichtiges Anwendungsfeld. Daher treibt das GFZ diese Entwicklung voran. Die Grundlagen hierfür wurden im Rahmen des von der Europäischen Union (EU) geförderten und vom GFZ koordinierten Projekts G3P (Global Gravity-based Groundwater Product) zwischen 2020 und 2022 erarbeitet. Zur Ableitung von Veränderungen

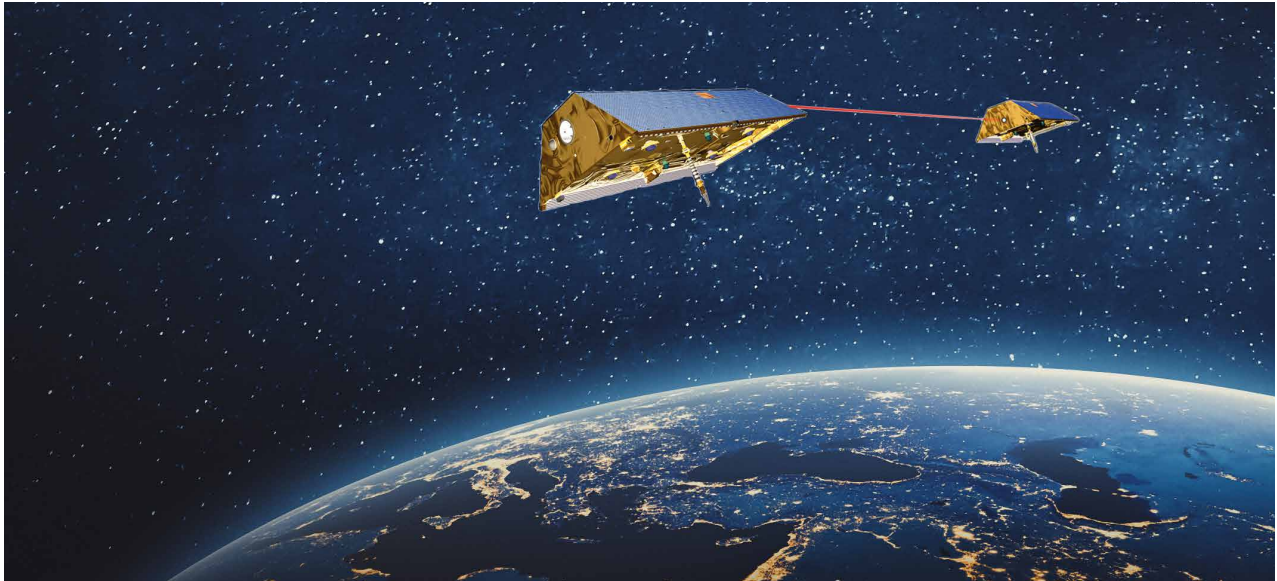


Bild: 1xpert - stock.adobe.com/bearbeitet

der Grundwasserspeicherung aus den TWS-Beobachtungen von GRACE/GRACE-FO müssen alle anderen hydrologischen Speicherkompartimente (Gletscher, Schnee, Bodenfeuchte sowie Oberflächengewässer) reduziert werden. G3P verfolgt dafür den Ansatz, möglichst andere globale Datensätze, die auf Messungen von Erdbeobachtungssatelliten beruhen, für die Reduktion zu verwenden. Solche Datensätze stehen im EU-Erdbeobachtungsprogramm Copernicus für viele Variablen zur Verfügung und wurden im Rahmen von G3P weiterentwickelt und mit den schwerebasierten

TWS-Daten kombiniert. Die so ermittelten globalen monatlichen Datensätze der Grundwasserspeicheränderungen mit einer Auflösung von einem halben Grad auf einem geographischen Gitter (entsprechend etwa 50 km am Äquator) werden ebenfalls über das Datenportal GraviS veröffentlicht. Die Ergebnisse zeigen beispielsweise bei der Betrachtung der langjährigen Trends der Grundwasserspeicherung jene Regionen weltweit, in denen auf Grund einer zu großen, nicht nachhaltigen Nutzung des Grundwassers zumeist für Bewässerungszwecke eine langfristige Zehrung der Grund-

wasservorräte auftritt (Abb. 3). Mit der angestrebten Weiterentwicklung des G3P-Produkts soll künftig ein operationeller Datenservice für Grundwasservariationen im Rahmen des Copernicus Climate Change Service erstellt werden. Für diese wie für andere Anwendungen der Satellitengravimetrie ist aus der Perspektive der Anwender:innen oft die geringe räumliche Auflösung ein limitierender Faktor. Methoden basierend auf Machine Learning zur räumlichen Disaggregation/Downscaling werden am GFZ kontinuierlich weiterentwickelt.

Literatur

- 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* 47(14). DOI: [10.1029/2020gl087285](https://doi.org/10.1029/2020gl087285).
- Flechtner, F., Dahle, C., Grunwaldt, L. (2017): Beobachtung von Massentransporten im System Erde mit GRACE und GRACE-FO. - *System Erde*, 7, 2, 12-17. <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.07.02.2>
- Güntner, A., Gerdener, H., Boergens, E., Kusche, J., Kollet, S., Dobslaw, H., Hartick, C., Sharifi, E., Flechtner, F. (2023): Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie. - *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 67, 2, 74-89. https://doi.org/10.5675/HyWa_2023.2_1
- WMO (2022): The 2022 GCOS Implementation Plan (GCOS-244). World Meteorological Organization, <https://gcos.wmo.int/en/publications/gcos-implementation-plan2022>, DOI: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22134#.Y6RsIRWZMdg