

# Die Variabilität des kontinentalen Wasserkreislaufs in GRACE-Schwerefelddaten

Andreas Güntner, Benjamin Creutzfeldt, Robert Dill, Franz Barthelmes  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Water is stored at very different places on Earth as vapor, liquid or in solid state. It is constantly exchanged between the storage compartments in atmosphere, ocean and on the continents. With time-variable gravity fields of the satellite mission GRACE, GFZ provides unique data sets for continental hydrology and climate research to describe water storage variations at large spatial scales. This allows to quantify the related water fluxes and to make a substantial contribution towards a better understanding of the global climate system and its water cycle including freshwater resources from regional to global scales. In addition, research at GFZ improves prognostic capabilities of hydrological models by integrating GRACE data and adds complementary small-scale data from ground-based gravimetry to study water storage dynamics. Decadal variations and long-term trends, either due to climate variability or anthropogenic impact, can only be adequately resolved, however, by extended gravity time series in the course of a GRACE Follow-On mission.*



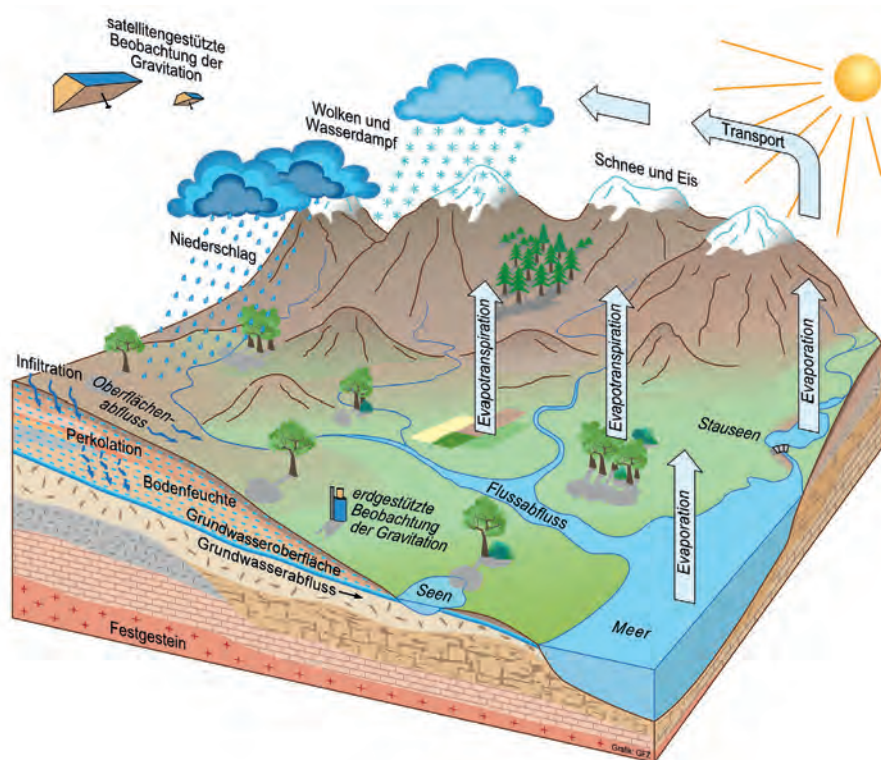


Abb. 1: Der globale Wasserkreislauf: Wasserspeicherung und Wasserflüsse innerhalb und zwischen Kontinenten, Ozean und Atmosphäre

Fig. 1: The global water cycle: water storage and water fluxes in and between continents, ocean and atmosphere

Wasser wird auf der Erde an zahlreichen Orten gespeichert: in den Ozeanen, als Wasserdampf in der Atmosphäre und in natürlichen Speichern auf den Kontinenten. Hierzu zählen Oberflächengewässer wie Bäche, Flüssen, Seen und Feuchtgebiete, unterirdische Wasservorkommen im Boden und Gestein als Grundwasser, sowie die Speicherung von Wasser in gefrorener Form als Schnee und Gletschereis. Auch in der Vegetation ist Wasser gespeichert. Zwischen allen Speicherkompartimenten steht das Wasser in einem ständigen Austausch. Von der Landoberfläche und den Ozeanen verdunstet Wasser und gelangt als Wasserdampf in die Atmosphäre. Kondensiert der Wasserdampf zu Niederschlag, füllt Wasser als Regen oder Schnee wiederum die verschiedenen Speicher auf den Kontinenten. Wasser, das von dort nicht wieder verdunstet, fließt über das Gewässernetz oder als Grundwasser zurück in den Ozean.

Diese vielfältigen Speicher- und Austauschprozesse bilden den globalen Wasserkreislauf, der einerseits stark vom gegenwärtigen und künftigen Klima abhängt sowie andererseits die Klimaentwicklung selbst beeinflusst. Eine globale Erwärmung um 1 °C erhöht theoretisch die Aufnahmekapazität der Atmosphäre für Wasserdampf um 7 %, was eine Erhöhung der Niederschläge zur Folge haben könnte. Bislang sind solche Modellabschätzungen jedoch kaum durch empirische Daten zu belegen, da es nur für wenige Regionen ausreichende Messdaten gibt.

Der Wasserkreislauf auf den Kontinenten unterliegt vielfältigen Variationen in Raum und Zeit. Je nach Klimazone, Jahreszeit oder naturräumlichen Gegebenheiten variiert die Wasserbilanz zwischen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicherung. Umweltveränderungen wie Klimawandel, Änderung der Landbedeckung und der Landnutzung durch die Ausweitung landwirtschaftlicher Nutzflächen oder urbaner Flächen und andere anthropogene Eingriffe wie der Bau von Stauseen oder die Entnahme von Grundwasser können erhebliche Auswirkungen auf den Wasserkreislauf haben. Unser Wasserbedarf wird aus den Süßwasserressourcen der Erde gedeckt, aus Oberflächengewässern wie Flüssen und Seen, in vielen Regionen aber insbesondere aus dem im Untergrund gespeicherten Wasser. Dieses Grundwasser deckt weltweit etwa 50 % des Wasserbedarfs für Haushalte, Landwirtschaft und Industrie, in ländlichen Gebieten bis zu 90 %. Die künftige wirtschaftliche und soziale Entwicklung der Gesellschaft hängt in vielen Regionen von der Verfügbarkeit und der nachhaltigen Bewirtschaftung von Wasser ab. Bisherige Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf den globalen

Links: Versickerungsbecken zur Grundwasseranreicherung für die Trinkwasserversorgung in der Nähe von Tucson, Arizona, USA

Left: Groundwater recharge facility for drinking water supply close to Tucson, Arizona, USA



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

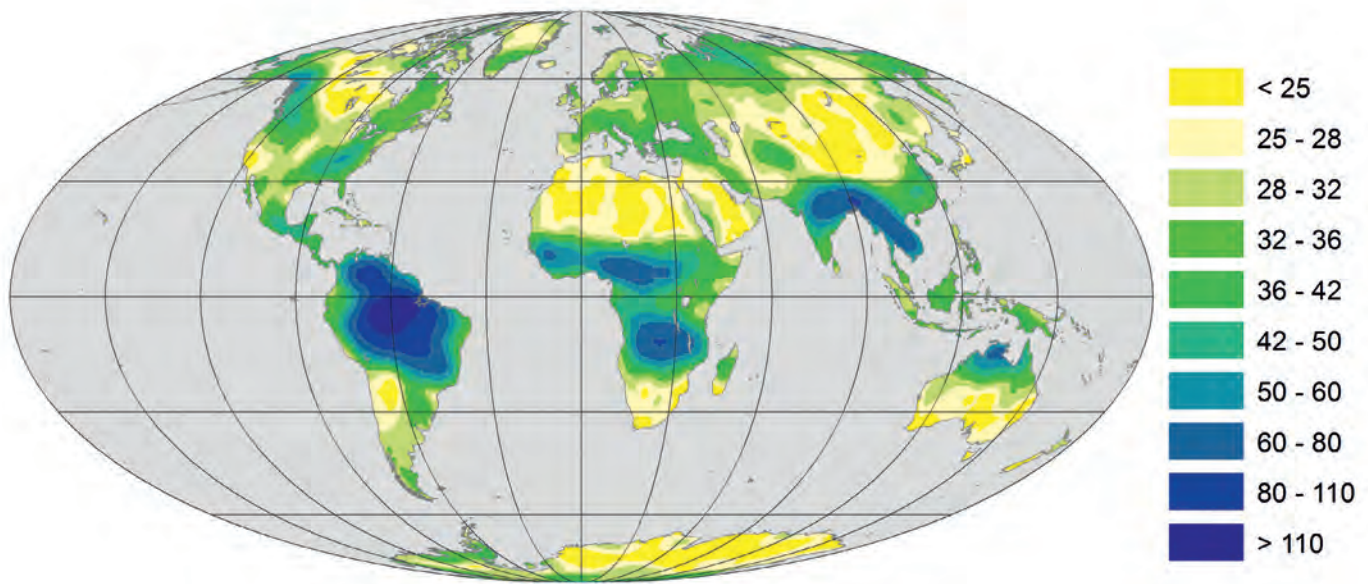


Abb. 2: Mittlere monatliche Variabilität der kontinentalen Wasserspeicherung aus GRACE-Daten für den Zeitraum 2002 bis 2011 in mm Wassersäule (Datenquelle: GRACE-Schwerefelder des GFZ, Release RLo4)

Fig. 2: Mean monthly variability of continental water storage from GRACE data for the period 2002-2011 (Data source: GRACE gravity fields of GFZ, Release RLo4)

len Wasserkreislauf und auf die Wasserverfügbarkeit in einzelnen Regionen sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet.

### Speichervariationen aus GRACE

Vielfach ist die Verfügbarkeit von Wasser einschließlich ihrer Veränderungen und Variabilitäten noch nicht ausreichend bekannt und verstanden. Die terrestrische Messung der Wasserspeicherung ist schwierig, einerseits weil diese Größe sehr viele verschiedene Kompartimente umfasst, die jeweils einzeln bemessen werden müssten. Zum anderen besteht die Schwierigkeit darin, dass insbesondere das Wasser im Untergrund schwer zugänglich ist. Wassermengen können oft nur aus Punktmessungen und mit indirekten Verfahren abgeschätzt werden. Mit der Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) können hingegen zeitliche Veränderungen der Erdanziehung gemessen werden, die ein direkter Ausdruck der auf oder unter der Erdoberfläche ablaufenden Massenveränderungen, so auch der Variationen der kontinentalen Wasserspeicherung sind (vgl. Beitrag von Flechtner und Förste in diesem Heft). Die außerordentliche Bedeutung von GRACE für die Hydrologie liegt darin, dass es das einzige Beobachtungssystem ist, das großräumig und über alle Speicherkompartimente integrierend Speicheränderungen auf den Kontinenten erfassen kann.

Mit GRACE konnten so erstmals globale Daten bereitgestellt

werden, die die Variabilität der Wasserspeicherung auf monatlichen, saisonalen bis hin zu interannuellen Zeitskalen zeigen (z. B. Schmidt et al., 2008). Gebiete großer Variabilität sind z. B. tropische und randtropische Bereiche, die durch einen saisonalen Wechsel von Regen- und Trockenzeiten geprägt sind (Abb. 2). In der Regenzeit wird dort Wasser im Boden, im Grundwasser aber auch in den Überschwemmungsgebieten entlang großer Flüsse wie Amazonas oder Ganges gespeichert. Deutlich treten in der Abbildung 2 auch Gebiete in hohen Breiten hervor, die durch die Schneeakkumulation im Winter und die Schmelze im Frühjahr und Sommer große saisonale Variationen der Wasserspeicherung aufweisen. Für große Regionen oder große Flusseinzugsgebiete können die Speicheränderungen zwischen ausgewählten Monaten aus den nun 10-jährigen Zeitreihen von GRACE bestimmt werden. Ein Beispiel hierfür sind die starken saisonalen Signale in der Gebirgsregion Zentralasiens, die durch Schneeakkumulation im Winter, durch Schneeschmelze im Sommer, aber auch durch Wasserverluste im Sommer wegen hoher Verdunstungsraten entstehen (Abb. 3).

Mit den langen Messreihen von GRACE können zum ersten Mal auch langfristige Veränderungen im Wasserhaushalt gemessen werden. So zeigt sich beispielsweise für Zentralasien eine graduelle Abnahme in den Jahren 2005 bis 2008 auf Grund geringer Niederschläge insbesondere im Winter und eine folgende Wiederauffüllung der Speicher ab 2009. Diese inter-

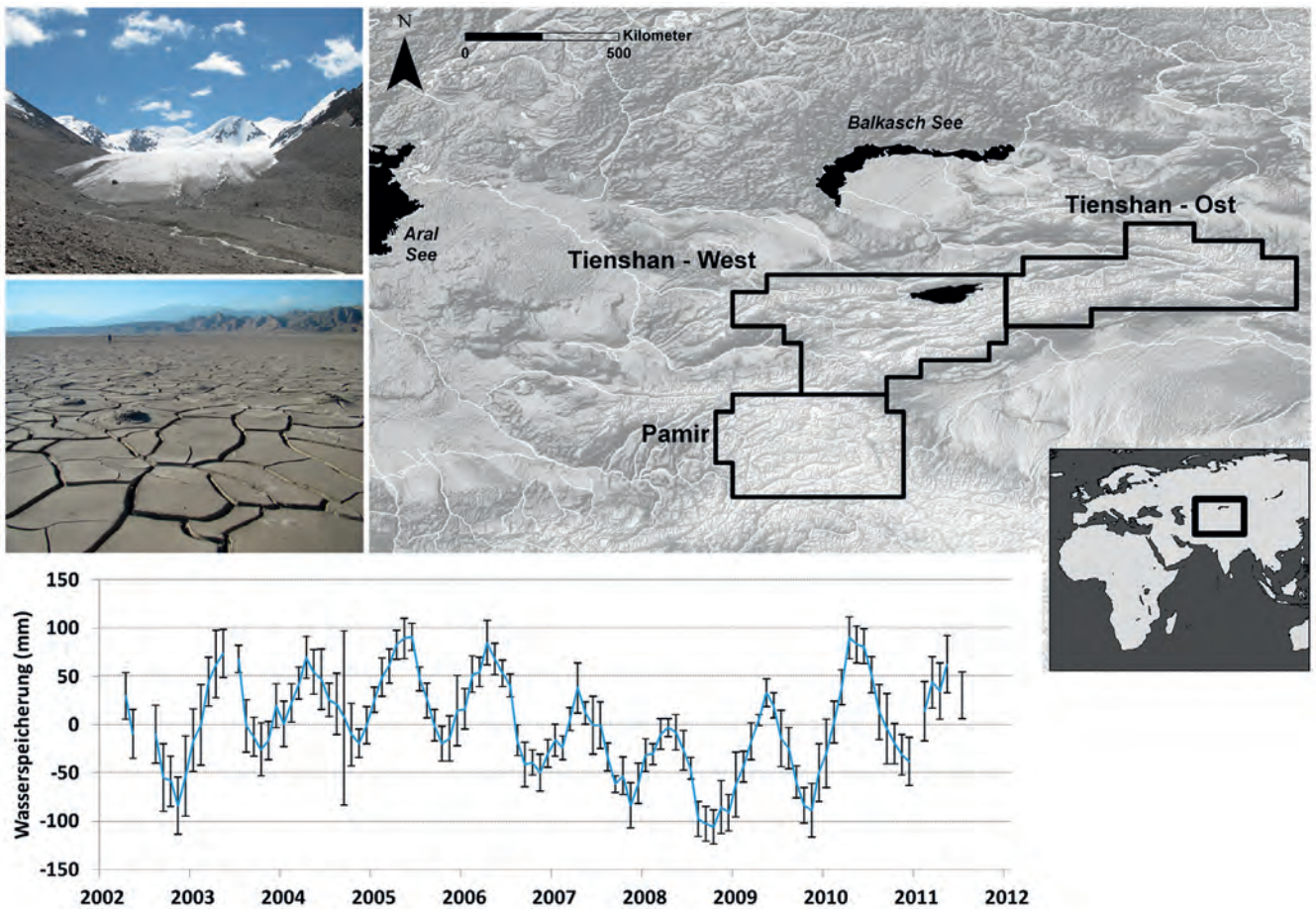


Abb. 3: Variationen der Wasserspeicherung für die zentralasiatischen Gebirgsregionen des Pamir und Tien Shan aus GRACE (Datenquelle: GRACE-Schwerefelder des GFZ, Release RLo4) (Foto links, Mitte: Aleksei Dudashvili, ZAIAG)

Fig. 3: Variations of water storage in the Central Asian high mountains of Pamir and Tien Shan from GRACE (Data source: GRACE gravity fields of GFZ, Release RLo4) (Foto middle, left: Aleksei Dudashvili, CAIAG)

annualen Variationen von bis zu 200 mm Wasseräquivalent entsprechen in der etwa 500 000 km<sup>2</sup> großen Region einem Wasservolumen von rund 100 km<sup>3</sup>. Diese Wassermenge würde etwa zweimal den Bodensee füllen.

Global werden mit Hilfe von GRACE viele Regionen mit langfristigen Veränderungen im Wasserkreislauf sichtbar (Abb. 4). So können beispielsweise in Grönland, Alaska und Patagonien die Massenverluste von Gletschern und kontinentalen Eisschilden auf Grund steigender Lufttemperaturen quantifiziert werden (vgl. den Beitrag von Sasgen et al. in diesem Heft). Negative Trends der Wasserspeicherung treten auch in weiten Teilen Australiens auf und beschreiben das Ausmaß der dort in den letzten Jahren herrschenden Dürre. Anthropogene Effekte auf die Speicherung im Grundwasser konnten mit GRACE großräumig z. B. für Gebiete im Nordwesten Indiens (Rodell et al., 2009) gezeigt werden. Dort führt die umfangreiche Entnahme von Grundwasser für die Bewässerung landwirtschaftlicher

Flächen zu einer steten Abnahme der Wasserspeicherung. Dies ist ein Indiz für die nicht nachhaltige Wassernutzung in diesen Regionen. Dies bedeutet, dass die Wasserentnahme aus dem Untergrund die auf natürliche Weise durch Niederschläge stattfindende Grundwasserneubildung übersteigt.

Für den mit GRACE beobachteten Zeitraum 2002 bis 2012 zeigen einige Regionen auch einen Massenzuwachs. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass in den GRACE-Beobachtungen durch den Prozess der postglazialen Landhebung positive Massentrends in Skandinavien und Kanada auftreten, die keine hydrologische Ursache haben. Im Einzugsgebiet des Amazonas, im südlichen Afrika in Teilen der Flussgebiete von Okavango und Sambesi, aber beispielsweise auch China wird hingegen eine Zunahme der Wasserspeicherung sichtbar. Derartige Veränderungen können auf sich langfristig ändernde Wasserbilanzen im Zuge des Klimawandels hindeuten, also zum Beispiel bei zunehmenden Niederschlägen oder

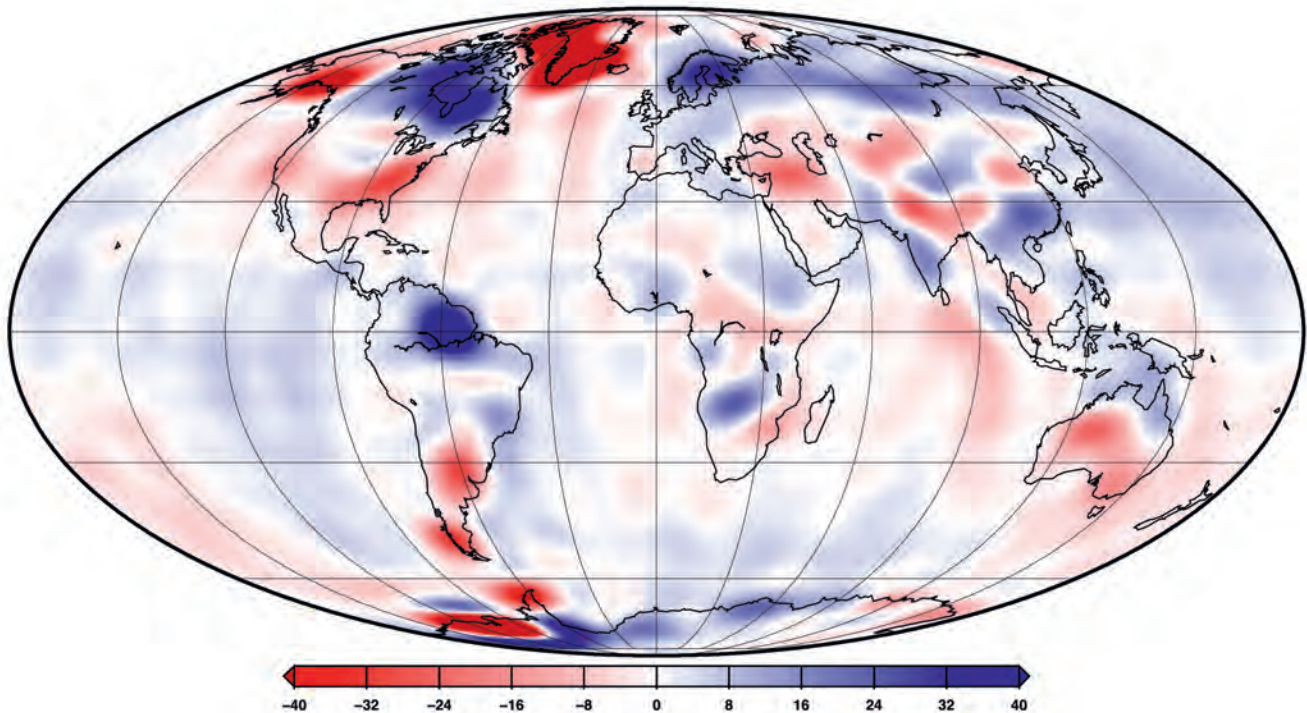


Abb. 4: Trend der Massenvariationen aus GRACE (2003-2009; Datenquelle: GRACE-Schwerefelder des GFZ, Release RLo4) in Millimeter Wasseräquivalent

Fig. 4: Mass trends from GRACE (2003-2009; Data source: GRACE gravity fields of GFZ, Release RLo4) in millimeter water equivalent

abnehmenden Verdunstungsraten. Sie können auch Ausdruck natürlicher dekadischer Variationen im Klimasystem sein, die diesen Regionen vorübergehend feuchtere Bedingungen beschert. Diese werden durch die noch vergleichsweise kurzen GRACE-Zeitreihen nur ausschnittsweise erfasst. So kann eine zunehmende Wasserspeicherung in weiten Teilen Sibiriens (Abb. 4) durch eine positivere klimatische Wasserbilanz für den Betrachtungszeitraum erklärt werden (Landerer et al., 2010). Das heißt, dass durch mehr Niederschlag und/oder eine geringere Verdunstung mehr Wasser in dieser Region verbleibt. Der mögliche langfristige Beitrag durch das Auftauen von Permafrostböden wurde hingegen bisher weder in seiner Größenordnung noch in seiner Richtung (Massenzuwachs oder -abnahme) erkennbar.

## Ausblick

Mit zeitvariablen Schwerefeldern von GRACE stehen einzigartige Daten für die Beschreibung großräumiger Speicheränderungen in der kontinentalen Hydrologie zur Verfügung. Die Daten tragen wesentlich zu einem umfassenderen Verständnis des globalen Klimasystems und des daran gekoppelten

Wasserkreislaufs bei. Entsprechende hydrologische Prozesse und Wasserflüsse können so besser quantifiziert werden. Durch die Einbindung der Daten in Computermodelle des Wasserkreislaufs kann deren Prognosefähigkeit als Grundlage eines nachhaltigen Wassermanagements von großen Gebieten verbessert werden (Werth et al., 2009). Als bodengestütztes Pendant zu den Satellitendaten können mit Gravimetern gemessene Schwerevariationen entsprechend für kleinräumige hydrologische Studien eingesetzt werden. Moderne Supraleitgravimeter zeichnen sehr genau und hochaufgelöst jegliche zeitliche Veränderung der Erdschwere auf, die durch Wassermassenveränderung verursacht wird (Abb. 5). Somit ermöglichen Gravimetermessungen beispielsweise die Auswirkung von Trockenperioden auf die Wasserressourcen im Untergrund zu erkunden, ohne dabei aufwändige Bohrungen durchführen zu müssen (Creutzfeldt et al., 2012). Die Ergebnisse von GRACE-Anwendungen in der Hydrologie zeigen aber auch, dass eine Fortsetzung von globalen zeitvariablen Schwerefeldmessungen im Rahmen einer GRACE-Nachfolgeemission (GRACE-FO) ab 2016 dringend erforderlich ist. Nur mit entsprechend langen Zeitreihen ist die Beschreibung und Trennung mehrjähriger zyklischer Variationen der Wasserspeicherung von zum Teil anthropogen verursachten langfristigen Trends möglich.

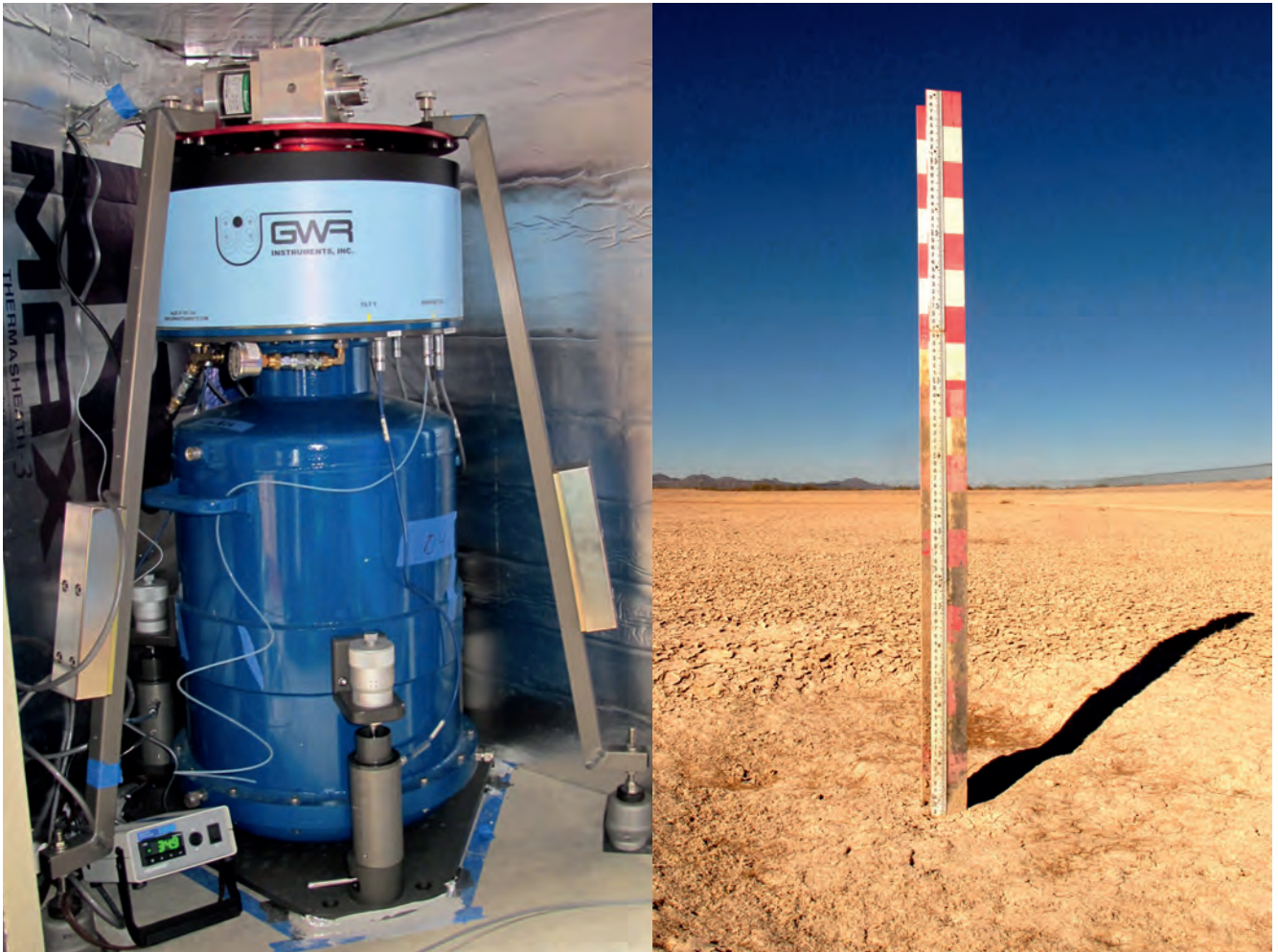


Abb. 5: Links: Supraleitgravimeter; rechts: Einsatz zur Erfassung von Speichervariationen im Untergrund von Trinkwasserver-sickerungsbecken in Tucson, Arizona, USA

## Literatur

- Creutzfeldt, B., Ferre, T., Troch, P. A., Merz, B., Wziontek, H., Güntner, A. (2012 online first): Total water storage dynamics in response to climate variability and extremes - Inference from long-term terrestrial gravity measurement. - *Journal of Geophysical Research*, 10.1029/2011JD016472.
- Landerer, F. W., Dickey, J. O., Güntner, A. (2010): Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003 - 2009. - *Journal of Geophysical Research*, 115, D23115, 10.1029/2010JD014584.
- Rodell, M., Velicogna, I., Famiglietti, J. S. (2009): Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. - *Nature*, 460, 7258, 999-1002, 10.1038/nature08238.
- Schmidt, R., Petrovic, S., Güntner, A., Barthelmes, F., Wunsch, J., Kusche, J. (2008): Periodic components of water storage changes from GRACE and global hydrological models. - *Journal of Geophysical Research*, 113, B08419, 10.1029/2007JB005363.
- Werth, S., Güntner, A., Petrovic, S., Schmidt, R. (2009): Integration of GRACE mass variations into a global hydrological model. - *Earth and Planetary Science Letters*, 277, 1-2, 166-173, 10.1016/j.epsl.2008.10.021

Fig. 5: Left: Superconducting gravimeter; right: Application for the assessment of water storage variations in the subsurface of infiltration tanks for drinking water supply