
Beobachtungen klimabedingter Änderungen im globalen Wasserkreislauf mit Satellitengravimetrie

Annette EICKER

HafenCity Universität Hamburg · annette.eicker@hcu-hamburg.de

Zusammenfassung

Das Schmelzen von Gletschern und Eiskappen, der Anstieg des Meeresspiegels, ein vermehrtes Auftreten von Dürren und Überflutungen - viele der durch den Klimawandel hervorgerufenen Phänomene sind mit einer Umverteilung von Wassermassen verbunden. Die dadurch hervorgerufenen zeitlichen Variationen im Gravitationsfeld der Erde wurden von der geodätischen Satellitenmission GRACE über 15 Jahre lang vermessen. Die aus diesen Daten berechneten monatlichen Gravitationsfeldmodelle können genutzt werden, um Klimaveränderungen zu quantifizieren und somit unser Verständnis des globalen Wandels zu verbessern. Von besonderer Bedeutung für die Klimaforschung sind dabei Langzeitvariationen, wie sie sich in Form (linearer) Trends in Gravitationsfeldzeitreihen ausdrücken. Im Folgenden wird die Bedeutung der GRACE-Mission für die Vermessung des Klimawandels diskutiert, eine aus GRACE-Daten abgeleitete globale Karte von Massentrends gezeigt und beispielhaft Zeitreihen von Eismassenbilanzen in Polargebieten, von dürrebedingten Grundwasserverlusten und von der Veränderung von Oberflächengewässern analysiert.

1 Einleitung

1.1 Die Satellitenmission GRACE

Die Zwillingssatellitenmission GRACE (Gravity and Climate Experiment, TAPLEY et al. (2004)) Mission wurde als Gemeinschaftsprojekt mit der amerikanischen Weltraumbehörde NASA und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Jahr 2002 gestartet und lieferte über 15 Jahre wissenschaftliche Daten zur Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde. Sie ermöglichte somit erstmalig die Vermessung zeitlicher Variationen (Monatslösungen) von Massenverteilungen im Erdsystem auf globaler Skala mit einer räumlichen Auflösung von etwa 300 bis 500 km. Die wichtigste Beobachtungsgröße der Mission war die Veränderung des Abstands zwischen den beiden GRACE-Satelliten, welche mit einer Distanz von ca. 220 km in ca. 500km Höhe auf derselben Umlaufbahn um die Erde flogen. Die Abstandsänderung wurde mit Hilfe eines Mikrowellengerätes im K-Band mit einer Genauigkeit von wenigen μm beobachtet. Zusätzlich ermöglichte je ein GPS-Empfänger an Bord beider Satelliten die Bestimmung der Satellitenbahnen und je ein Akzelerometer erfasste die nicht-gravitativen Störkräfte, wie sie beispielsweise durch Atmosphärenreibung und den Strahlungsdruck der Sonne hervorgerufen werden. Der wissenschaftliche Betrieb der GRACE-Satelliten wurde im September 2017 eingestellt. Die Nachfolgemission Grace-Follow-On (GRACE-FO, FLECHTNER et al. 2016), gestartet im Mai 2018 ebenfalls als

deutsch-amerikanische Kooperation, soll die erfolgreiche Zeitreihe zeitvariabler Schwerefeldmodelle fortsetzen.

1.2 Bedeutung von GRACE für die Vermessung klimabedingter Massenänderungen

Die aus GRACE-Daten berechneten monatlichen Gravitationsfeldmodelle haben seit dem Start der Mission unser Verständnis des globalen Wasserkreislaufs signifikant verbessert. Erstmals ist es möglich, mit globaler Abdeckung großräumige Änderungen der Massenverteilung im Erdsystem zu quantifizieren, wie sie beispielweise durch das Schmelzen der Polkappen, den Anstieg des Meeresspiegels oder durch Umverteilungen im kontinentalen Wasserkreislauf hervorgerufen werden. Dabei unterscheidet sich die Charakteristik der GRACE-Beobachtungen von anderen Fernerkundungsdaten und die folgenden Besonderheiten können als Alleinstellungsmerkmale der Satellitengravimetrie bezeichnet werden:

- In Bezug auf die Schätzung von Eismassenbilanzen beobachtet GRACE direkt die Massenänderungen und vermeidet somit Schwierigkeiten, die mit einer unsicheren Konvertierung von Volumenänderung zu Massenverlust einhergehen, wie sie beispielsweise bei der Satellitenaltimetrie notwendig ist.
- Bei der Quantifizierung von Meeresspiegelvariationen ermöglicht GRACE (in Kombination mit der geometrischen Meeresspiegeländerung aus Satellitenaltimetrie) die Trennung des durch Wärmeausdehnung hervorgerufenen sterischen Meeresspiegelanstiegs von dem Masseneffekt, wie er durch zusätzlichen Süßwassereintrag aufgrund schmelzender Eismassen entsteht.
- Ebenfalls in Kombination mit der Satellitenaltimetrie liefert ein aus GRACE-Daten (oder anderen Satellitenschwerefeldmissionen) abgeleitetes hochauflösendes globales Geoid die Grundlage für die Bestimmung von Ozeanströmungen.
- GRACE ist das einzige globale Beobachtungsverfahren, das Änderungen in der kompletten vertikalen Wassersäule (inklusive des ansonsten für Fernerkundungsverfahren nicht zugänglichen Grundwasserspeichers) erfassen kann.

Viele der durch das Global Climate Observing System (GCOS) definierten Schlüsselparameter im Erdsystem („Essential Climate Variables“ (ECVs), siehe WMO (2011)) stehen in direktem Bezug zu Massenspeichervariationen: Meeresspiegel, Fluss-Abfluss, Grundwasser, Seen, Schneebedeckung, Gletscher und Eiskappen, Eisschilde, Permafrost. In einer Vielzahl wissenschaftlicher Studien wurden in den vergangenen Jahren diese Phänomene untersucht. Beispiele für die Quantifizierung polarer Eismassenverlusten in Grönland und der Antarktis finden sich in VELICOGNA et al. (2014) und RAN et al. (2018). RIETBROEK et al (2016) zeigt den Nutzen der Satellitengravimetrie für die Analyse globaler und regionaler Meeresspiegelvariationen und insbesondere für die Zerlegung der Meeresspiegeländerungen in ihre unterschiedlichen Beiträge. Eine übersichtliche Diskussion zu Langzeitänderungen in der kontinentalen Hydrologie gibt ROPELL et al. 2018 und SCANLON et al. (2018) zeigt einen ausführlichen Vergleich hydrologischer Modelle mit GRACE-Daten in Bezug auf die Darstellung von Langzeittrends mit der Schlussfolgerung, dass die Wasserspeicheränderungen von den meisten Modellen unterschätzt werden. Um die jeweiligen Vorteile von geophysikalischen Modellen und Beobachtungen bestmöglich kombinieren zu können, geht ein aktueller Trend in die Richtung der Assimilation geodätischer Satellitendaten in Erdsystemmodelle, siehe z.B. EICKER et al. (2014) oder GIROTTO et al. (2016).

2 Daten und Methodik

2.1 GRACE-Daten

Für die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse wurden monatliche Gravitationsfeldmodelle (sogenannte Level 2 Daten) der ITSG-Grace2016-Zeitreihe verwendet, welche an der TU Graz prozessiert wurden (MAYER-GÜRR et al. 2016) und in Form monatlicher Kugelfunktionskoeffizienten des Gravitationspotentials bis Grad $n = 90$ gegeben sind. Bevor aus den Level 2 Daten Massenvariationen abgeleitet werden können, müssen noch die folgenden Nachbearbeitungsschritte durchgeführt werden: Da die GRACE-Beobachtungen nicht sensitiv gegenüber Variationen des Massenzentrums der Erde sind, müssen für die Koeffizienten des Kugelfunktionsgrades $n=1$ externe Informationen hinzugezogen werden, hier der Output eines globalen Ozeanmodells (SWENSON et al. 2008). Der mit GRACE nicht gut bestimmbare Koeffizient c_{20} wird aus Ergebnissen des Satellite Laser Ranging ersetzt (CHENG et al., 2013). Zur Reduktion von Massentrends, die auf glazial-isostatischen Ausgleich (GIA) zurückzuführen sind, wird ein GIA-Modell subtrahiert (A et al. 2013). Aufgrund der Orbitkonfiguration und des Messprinzips sind GRACE-Gravitationsfeldmodelle durch räumlich stark korreliertes Rauschen beeinflusst. Um diesen Effekt zu reduzieren, wird ein Dekorrelationsfilter nach KUSCHE (2007) angewendet.

2.1 Berechnung äquivalenter Wasserhöhen

Aus den nach Kapitel 2.1 nachbearbeiteten Kugelfunktionskoeffizienten können im nächsten Schritt monatliche Massenänderungen in Form äquivalenter Wasserhöhen (equivalent water height, EWH) für jeden Punkt der Erde mit Hilfe der folgenden Formel berechnet werden:

$$EWH(\lambda, \vartheta) = \frac{M}{4\pi R^2 \rho_W} \sum_{n=1}^{n_{max}} \sum_{m=-n}^n \frac{2n+1}{1+k'_n} c_{nm} Y_{nm}(\lambda, \vartheta). \quad (1)$$

Dabei sind (λ, ϑ) die geographische Länge bzw. Poldistanz eines Gitterpunktes, M und R stehen für die Masse und den Referenzradius der Erde und ρ_W bezeichnet die Dichte von Wasser (1000 kg/m^3). Der Indizes n und m stehen für Grad und Ordnung der Kugelfunktionsentwicklung und die Koeffizienten c_{nm} bezeichnen die gefilterten Koeffizienten des Gravitationspotentials mit den zugehörigen Kugelflächenfunktionen $Y_{nm}(\lambda, \vartheta)$. Um (Wasser-)Massenvariationen an der Erdoberfläche von auflastbedingten Massenänderungen im Erdmantel zu trennen, werden entsprechend der elastischen Auflasttheorie die Load-Love-Zahlen k'_n in die Reihenentwicklung eingeführt (LAMBECK 1988).

2.2 Trendschätzung für jeden Gitterpunkt

Neben einer postulierten klimabedingten Zunahme hydrologischer Extremereignisse (siehe z.B. HUNTINGTON (2006)) ist anzunehmen, dass sich der Klimawandel auf den globalen Wasserkreislauf in erster Linie durch langzeitliche Veränderungen auswirkt. Diese werden im Folgenden in Form linearer Trendschätzungen diskutiert. Dazu wird für jeden Gitterpunkt das folgende funktionale Modell angesetzt und die unbekanntenen Koeffizienten im Sinne eines Kleinste-Quadrate-Ausgleichs geschätzt:

$$f(t) = a + b \cdot t + c \cdot \cos(\omega t) + d \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

Dabei steht der Koeffizient b für den linearen Trend, welcher für jeden Gitterpunkt in Abbildung 1 dargestellt ist. Zusätzlich werden in der Ausgleichung ein zeitlicher Mittelwert (a) und ein Jahresgang in Form einer harmonischen Funktion mit einer Periode von 365.25 Tagen angesetzt (c, d). Der Zeitraum für die Berechnung des Trends wurde auf volle Jahre innerhalb des GRACE-Zeitraums begrenzt (2003-2016).

3 Ergebnisse

3.1 Globale Trendkarte

Die für jeden Gitterpunkt geschätzten Massentrends werden in Abbildung 1 in einer globalen Karte dargestellt. Dabei bezeichnen dunkle Regionen einen Massenverlust und helle Regionen eine Massenzunahme. In den folgenden Abschnitten sollen beispielhaft einige räumlich gemittelte Zeitreihen für Grönland, die Antarktis, Kalifornien, Nordindien, sowie für die Oberflächengewässer Kaspisches Meer und Aralsee gezeigt werden. Ein Diskussion weiterer in der Karte sichtbarer Phänomene findet sich in RODELL et al. (2018).

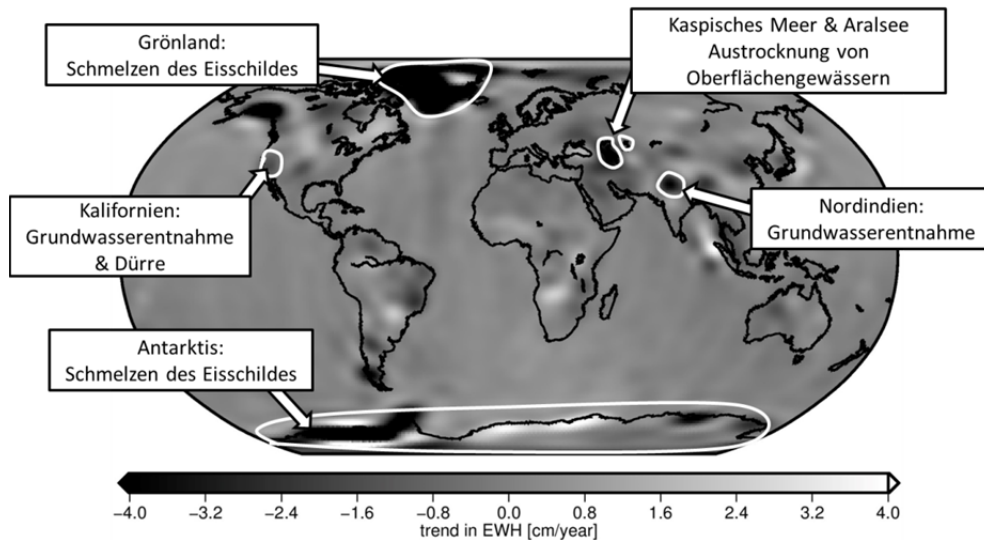


Abb. 1: Globale Karte geschätzter Massentrends aus Monatslösungen der ITSG-Grace2016 Zeitreihe (2003-2016). Die in den folgenden Kapiteln diskutierten Gebiete sind durch eine weiße Umrandung markiert.

3.2 Eismassenverlust

Die am deutlichsten messbaren klimabedingten Massenänderungen sind in den Polargebieten zu beobachten und äußern sich insbesondere durch das Abschmelzen des grönländischen und antarktischen Eisschildes. Die über die kontinentalen Flächen Grönlands und der

Antarktis gemittelten Zeitreihen monatlicher Massenvariationen sind in Abbildung 2 dargestellt. Zur Konvertierung der äquivalenten Wasserhöhen in Massenänderungen sind diese noch mit der entsprechenden Landoberfläche zu multiplizieren.

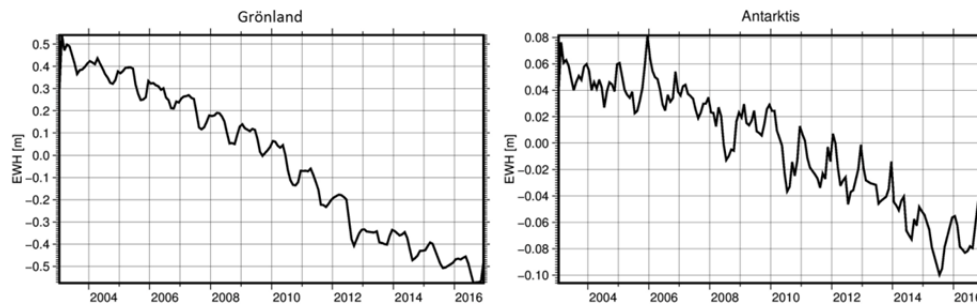


Abb. 2: Zeitreihe der Massenänderungen in Grönland und der Antarktis berechnet aus monatlichen GRACE-Daten der ITSG-Grace2016 Zeitreihe.

Für eine finale Quantifizierung des abgeschmolzenen Eises wären weitere Nachbearbeitungsschritte notwendig. Durch die notwendige Filterung der GRACE-Lösungen und der daraus resultierende niedrigen räumlichen Auflösung kommt es zu einer Verschmierung der Massenänderungen über das Untersuchungsgebiet hinaus (Leakage-Effekt), welche zu einer Unterschätzung des Massenverlustes führen würde. Eine besondere Bedeutung bei der Schätzung von Eismassenänderungen kommt daher einer aufwendigen Leakage-Korrektur zu (CHEN et al. 2015). Angaben zum Massenverlust in Grönland in der aktuellen Literatur bewegen sich im Bereich von -244 Gt/Jahr (HARIG & SIMONS 2016) bis hin zu -280 Gt/Jahr (VELICOGNA et al. 2014) bzw. 286 Gt/Jahr (RAN et al. 2018), wobei sich alle diese Studien auf GRACE-Daten von ungefähr 2003-2013 beziehen. Unterschiede kommen durch die Verwendung von GRACE-Monatslösungen unterschiedlicher Analysezentren, durch leicht verschiedene Beobachtungszeiträume und durch eine unterschiedliche Postprozessierung (GIA-Modell, Geozentrumsvariationen). Die größten Unsicherheiten werden in Grönland jedoch der unterschiedlichen Handhabung des Leakage-Effektes zugeschrieben. In der Antarktis variieren aktuell berechnete Massenänderungen im Bereich von -92 Gt/Jahr (Schrama et al. 2014) über -107 Gt/Jahr (Mu et al. 2017) bis hin zu -180 Gt/Jahr, wobei die größten Unterschiede hier dem sehr unsicheren GIA-Modell anzulasten sind.

3.3 Dürre und Grundwasserentnahme

Ein besonderer Erfolg der GRACE-Mission ist die erstmals mögliche Beobachtung dürrebedingter und/oder durch anthropogene Entnahmen beeinflusster Veränderungen im Grundwasserspeicher. Auf globaler Skala war dies vorher unmöglich, da unterirdische Wassermassenänderungen für klassische Fernerkundungsverfahren nicht zugänglich sind. Abbildung 3 zeigt beispielhaft Zeitreihen der Massenvariationen in Kalifornien und Nordindien, beides sehr trockene Regionen, die sich aber durch intensive landwirtschaftliche Nutzung und damit einhergehende Bewässerung aus Grundwasservorräten auszeichnen.

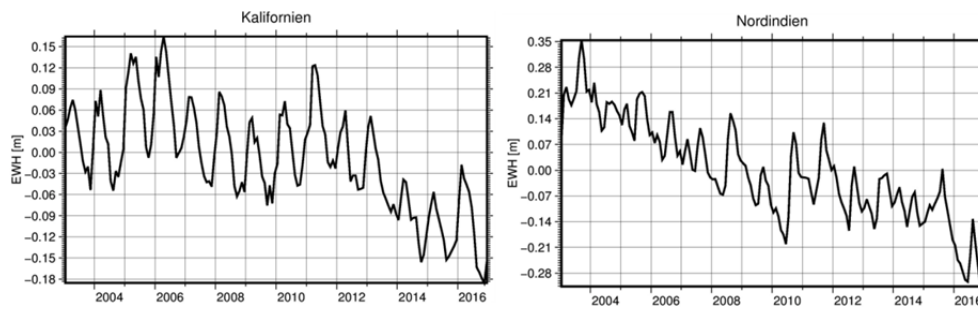


Abb. 3: Zeitreihe der Massenänderungen in Kalifornien und Nordindien berechnet aus monatlichen GRACE-Daten der ITSG-Grace2016 Zeitreihe.

In Nordindien war RODELL et al. (2009) erstmalig eine Quantifizierung menschlicher Grundwasserentnahmen aus dem Weltall gelungen und es wurde nach Abzug modellierter Bodenfeuchteänderungen ein Grundwasserverlust von 18 Gt/Jahr für den Zeitraum August 2002 bis Oktober 2008 festgestellt. An der Zeitreihe für Kalifornien lässt sich erkennen, dass es in dieser Region während des GRACE-Zeitraums zwei längere Dürrephasen gab (2007-2009 und 2012-2015). XIAO et al. (2017) geben den Massenverlust im ersten Zeitraum mit 16.5 Gt und im zweiten Zeitraum mit 40 Gt an und berechnen für den gesamten GRACE-Zeitraum eine Veränderung von -20.7 Gt mit substantieller Erholung der Grundwasservorräte während Zeit zwischen den beiden Dürren. Ein Vergleich der aus GRACE-Daten abgeleiteten Grundwasseränderungen mit in-situ Messungen in Grundwasserbrunnen zeigen sehr gute Übereinstimmungen (SCANLON et al. 2012).

3.4 Austrocknung von Oberflächengewässern

Die Auswirkungen (klimawandelbedingter) Trockenheit äußern sich selbstverständlich nicht nur in der Abnahme von Grundwasservorräten, sondern beeinflussen auch die Wasserverfügbarkeit in Oberflächengewässern. Diese mit Hilfe von GRACE-Daten zu quantifizieren stellte eine besondere Herausforderung dar, da es sich oft um starke Wassermassenänderungen in einem räumlich stark begrenzten Gebiet handelt und somit der Leakage-Effekt besonders hervortritt.

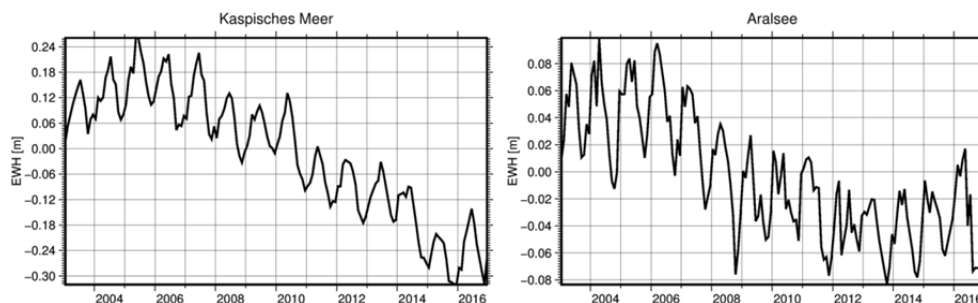


Abb. 4: Zeitreihe von Massenänderungen im Kaspischen Meer und im Aralsee berechnet aus monatlichen GRACE-Daten der ITSG-Grace2016 Zeitreihe.

Abbildung 4 zeigt die über die Wasserflächen des Kaspischen Meeres und des Aralsees gemittelten GRACE-Monatslösungen. Da hier noch keine Leakage-Korrektur angebracht

wurde, können aus den Zeitreihen nicht direkt Variationen der Oberflächengewässer abgeleitet werden. Allerdings lässt sich der prinzipielle Verlauf der Zeitreihen diskutieren. Im Kaspischen Meer gab es zunächst einen leichten Anstieg der Wassermassen, gefolgt von einer deutlichen Abnahme beginnend im Jahr 2007. Daraus ergibt sich zunächst noch ein relativ kleiner Trend des Wasserlevels von -4.5 cm/Jahr für den Zeitraum 2002-2006 (SWENSON & WAHR 2007), welcher sich auf -6 cm/Jahr für den Zeitraum 2002-2015 vergrößerte (CHEN et al. 2017). Im Aralsee gab es eine besonders deutliche Abnahme der Wassermassen im Zeitraum Mai 2006 bis Februar 2010 von ungefähr 7 Gt/Jahr (SINGH et al. 2016), während sporadische Niederschlagsereignisse in den darauf folgenden Jahren zu einer geringeren Massenabnahme und zuletzt sogar zu einer positiver Massenbilanz führten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In ihrer mehr als 15 Jahre langen Missionsdauer konnte die Satellitenmission GRACE erstmals mit globaler Abdeckung und vorher ungekannter Genauigkeit und Auflösung Massenvariationen im Erdsystem beobachten. Daraus hat sich eine Vielzahl neuer Anwendungen der geodätischen Daten für die Erdsystem- und Klimaforschung ergeben. In diesem Beitrag diskutierte Beispiele umfassen das Abschmelzen der Eisschilde in Grönland und in der Antarktis, Grundwasserverluste in Kalifornien und in Nordindien sowie die Abnahme von Oberflächengewässern im Kaspischen Meer und im Aralsee.

Verbesserungen in der Prozessierung der Satellitendaten haben in den letzten 15 Jahren zu einer stetigen Steigerung in der Genauigkeit der GRACE-Gravitationsfeldmodelle geführt. Herausfordernd bleibt jedoch nach wie vor die relativ geringe räumliche Auflösung von einigen 100km, welche durch die damit einhergehenden Leakage-Effekte eine Nutzung der GRACE-Daten für die Interpretation kleinskaliger Massenvariationen erschwert. Auch die zeitliche Auflösung von in der Regel monatlichen Schwerefeldmodellen behindert die Echtzeitnutzung beispielsweise in der Vorhersage von Überflutungsereignissen. Die Anforderungen diverser Nutzergruppen aus Hydrologie, Ozeanographie, Glaziologie und Geophysik und Klimaforschung an eine zukünftige Satellitenmission sind in PAIL et al. (2015) zusammengestellt.

In Bezug auf die Analyse klimainduzierter Massenvariationen wurde eine Verlängerung der Zeitreihe als wichtigste ... erkannt. Die momentan noch kurze Zeitreihe von 15 Jahren Daten ist noch weit von den normalerweise als klimarelevant angesehenen 30-Jahre Zeiträumen (Zitat!) entfernt. Hier liegen die Hoffnungen momentan auf der GRACE-FO-Mission, von der erwartet werden kann, dass sie in den nächsten Jahren die Zeitreihe fortsetzt. Eine deutliche klimarelevante Zeiträume von >30 Jahre, Trennung inter-annualer natürlicher Klimavariationen vom durch den Menschen beeinflussten langzeitlichen Klimawandel,... Validierung von Klimamodellen => JENSEN et al. (2019, eingereicht)

Literatur

- A, G., WAHR, J. & ZHONG, S. (2013): Computations of the viscoelastic response of a 3D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada, *Geophysical Journal International*, 192 (2), 557-572.

- CHEN, J. L., WILSON, C. R., LI, J., & ZHANG, Z. (2015): Reducing leakage error in GRACE-observed long-term ice mass change: a case study in West Antarctica. *Journal of Geodesy*, 89(9), 925-940.
- CHEN, J. L., WILSON, C. R., TAPLEY, B. D., SAVE, H. & J. F. CRETAX (2017): Long-term and seasonal Caspian Sea level change from satellite gravity and altimeter measurements, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 122(3), 2274-2290.
- CHENG, M., TAPLEY, B. D., & RIES, J. C. (2013): Deceleration in the Earth's oblateness, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (2), 740-747.
- FLECHTNER, F., NEUMAYER, K.-H., DAHLE, C., DOBSLAW, H., FAGIOLINI, E., RAIMONDO, J.-C. & GÜNTNER, A. (2016): What can be expected from the GRACE-FO laser ranging interferometer for Earth science applications?, *Surv. Geophys.*, 37(2), 453-470.
- GIROTTI, M., DE LANNOY, G. J., REICHLER, R. H., & RODELL, M. (2016): Assimilation of gridded terrestrial water storage observations from GRACE into a land surface model. *Water Resources Research*, 52(5), 4164-4183.
- HARIG, C., & SIMONS, F. J. (2016): Ice mass loss in Greenland, the Gulf of Alaska, and the Canadian Archipelago: Seasonal cycles and decadal trends, *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3150-3159.
- HUNTINGTON, T. (2006): Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis, *J. Hydrol.*, 319, 83-95.
- JENSEN, L., EICKER, A., DOBSLAW, H., STACKE, T., HUMPHREY, V. (2019, under revision): Long-term wetting and drying trends in land water storage derived from GRACE and CMIP5 models, submitted to *Journal of Geophysical Research – Atmosphere*.
- LAMBECK, K. (1988): *Geophysical geodesy: the slow deformations of the earth*, Oxford [Oxfordshire]: Clarendon Press ; New York: Oxford University Press.
- MAYER-GÜRR, T., BEHZADPOUR, S., ELLMER, M., KVAS, A., KLINGER, B., ZEHENTNER, N. (2016): ITSG-Grace2016 - Monthly and Daily Gravity Field Solutions from GRACE. GFZ Data Services, <http://doi.org/10.5880/icgem.2016.007> (11.11.2016).
- KUSCHE, J. (2007): Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time variable GRACE-type gravity field models, *Journal of Geodesy*, 81 (11), 733-749.
- MU, D., YAN, H., FENG, W., & PENG, P. (2017): GRACE leakage error correction with regularization technique: case studies in Greenland and Antarctica. *Geophysical Journal International*, 208(3), 1775-1786.
- PAIL, R., BINGHAM, R., BRAITENBERG, C., DOBSLAW, H., EICKER, A., GÜNTNER, A., ... & WOUTERS, B. (2015): Science and user needs for observing global mass transport to understand global change and to benefit society. *Surveys in Geophysics*, 36(6), 743-772.
- RAN, J., DITMAR, P., KLEES, R., & FARAHANI, H. (2018): Statistically optimal estimation of Greenland Ice Sheet mass variations from GRACE monthly solutions using an improved mascon approach, *Journal of Geodesy*, 92(3), 299-319.
- RIETBROEK, R., BRUNNABEND, S. E., KUSCHE, J., SCHRÖTER, J., & DAHLE, C. (2016): Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(6), 1504-1509.
- RODELL, M., FAMIGLIETTI, J. S., WIESE, D. N., REAGER, J. T., BEAUDOING, H. K., LANDERER, F. W. & M. H. Lo (2018): Emerging trends in global freshwater availability, *Nature*, 557(7707), 651-659.

- RODELL, M., VELICOGNA, I., & FAMIGLIETTI, J. S. (2009): Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460(7258), 999.
- SCANLON, B. R., ZHANG, Z., SAVE, H., SUN, A. Y., SCHMIED, H. M., VAN BEEK, L. P., ... & LONGUEVERGNE, L. (2018): Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201704665.
- SCANLON, B. R., LONGUEVERGNE, L., & LONG, D. (2012): Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*, 48(4).
- SCHRAMA, E. J. O., WOUTERS, B., & R. RIETBROEK, R. (2014): A mascon approach to assess ice sheet and glacier mass balances and their uncertainties from GRACE data, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 119(7), 6048-6066.
- SINGH, A., SEITZ, F., EICKER, A., & GÜNTNER, A. (2016): Water Budget Analysis within the Surrounding of Prominent Lakes and Reservoirs from Multi-Sensor Earth Observation Data and Hydrological Models: Case Studies of the Aral Sea and Lake Mead. *Remote Sensing*, 8(11), 953.
- SWENSON, S., CHAMBERS, D., & WAHR, J. (2008): Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113 (B8).
- SWENSON, S. & WAHR, J. (2007): Multi-sensor analysis of water storage variations of the Caspian Sea, *Geophysical Research Letters*, 34(16), L16401.
- TAPLEY, B., BETTADPUR, S., WATKINS, M., & REIGBER, C. (2004): The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results, *Geophysical Research Letters*, 31, L09607.
- VELICOGNA, I., SUTTERLEY, T.C. & AN DEN BROEKE, M. (2014): Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophys Res Lett* 41:8130–8137.
- WMO (2011): GCOS Systematic Observation Requirements For Satellite-Based Data Products for Climate - 2011 Update, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3710 (11.11.2018).
- XIAO, M., KOPPA, A., MEKONNEN, Z., PAGÁN, B. R., ZHAN, S., CAO, Q., ... & LETTENMAIER, D. P. (2017): How much groundwater did California's Central Valley lose during the 2012–2016 drought? *Geophysical Research Letters*, 44(10), 4872-4879.