

Andreas Güntner, Helena Gerdener, Eva Boergens, Jürgen Kusche, Stefan Kollet, Henryk Dobslaw, Carl Hartick, Ehsan Sharifi & Frank Flechtner

Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie

Water storage changes in Germany since 2002 from satellite gravity observations

Seit dem Jahr 2018 traten in weiten Teilen Europas unterdurchschnittliche Jahresniederschläge und überdurchschnittliche Lufttemperaturen auf, einhergehend mit fallenden Wasserständen in Seen und im Grundwasser, Niedrigwasserbedingungen in Flüssen, Schäden an Ökosystemen und negativen Auswirkungen in verschiedenen Wirtschaftssektoren. Dies führte zu einer öffentlichen Diskussion zur gegenwärtigen und künftigen Verfügbarkeit der Wasserressourcen. In Deutschland wurde diese Debatte zudem verstärkt durch Medienberichte über die drastisch abnehmende Gesamtwasserspeicherung (Terrestrial Water Storage (TWS)) basierend auf Daten der Satellitengravimetrieemissionen GRACE und GRACE-FO. Der dort verwendete Datensatz des amerikanischen Analyse-zentrums JPL (JPL-Mascons-Datensatz) zeigt einen TWS-Rückgang von 2,4 Gigatonnen pro Jahr (Gt/Jahr) für die Fläche von Deutschland im Zeitraum von November 2002 bis Oktober 2021. Um der Diskussion eine breitere wissenschaftliche Grundlage zu liefern, wird hier zunächst das Konzept sowie die Möglichkeiten und Einschränkungen der Satellitengravimetrie vorgestellt. Anschließend werden neben den JPL-Mascons-Daten drei weitere GRACE/GRACE-FO-Datenprodukte (COST-G, GFZ und ITSG Graz/Universität Bonn), die einen über Deutschland gemittelten TWS-Trend von -0,7 bis -1,3 Gt/Jahr für die genannte Periode ergeben. Da satellitengravimetrische Messungen aufgrund des Mess- und Auswertepinzips auch zu einem gewissen Anteil Massenveränderungen räumlich außerhalb des eigentlich interessierenden Bereichs erfassen, führt der Massenverlust der Alpengletscher zu einem etwas stärker negativen Trend in Deutschland, der hier herausgerechnet wurde. Die unterschiedlichen Ergebnisse für die verschiedenen Datenprodukte weisen auf die Unsicherheiten in den GRACE-Daten hin und die vergleichende Betrachtung mehrerer Datensätze wird somit empfohlen. Die deutlich anderen Ergebnisse des JPL-Mascons-Datensatzes sind möglicherweise mit seiner in mehreren Punkten abweichenden Prozessierungsmethode begründet. Angesichts extrem positiver TWS-Anomalien im niederschlagsreichen Jahr 2002 und sehr negativer Anomalien in den Dürre Jahren 2018 und 2019 ist weiterhin zu betonen, dass die resultierenden Trendwerte stark von dem gewählten Zeitraum abhängen. Eine längere, mit einem hydrologischen Modell simulierte TWS-Zeitreihe von Deutschland zeigt zum einen eine gute Übereinstimmung mit den TWS-Beobachtungen, zum anderen dass die Trendwerte der Periode der Satellitengravimetrie nicht repräsentativ für die langfristige Entwicklung sind und nicht zur Extrapolation auf die zukünftigen Trends der Gesamtwasserspeicherung verwendet werden sollten.

Schlagwörter: Wasserspeicherung, Wasserhaushalt, Extremereignisse, Fernerkundung, Gravimetrie

Since 2018, large parts of Europe have experienced below-average annual precipitation and above-average air temperatures. These phenomena were accompanied by falling water levels in lakes and groundwater, low flow conditions in rivers, damage to ecosystems and negative impacts in various economic sectors, leading to a public debate on the current and future availability of water resources. In Germany, this debate has been boosted by media reports on drastically decreasing terrestrial water storage (TWS) based on satellite gravimetry of GRACE and GRACE-FO, in which results based on data of the U.S. analysis center JPL (JPL Mascons data) indicate a TWS decrease of -2.4 Gt/year for Germany from 11/2002 to 10/2021. To provide a more robust scientific basis for the ongoing debate this paper first introduces the concept of satellite gravimetry, including its potential and limitations. Besides the JPL Mascons data, we then analyze three other GRACE and GRACE-FO data products (COST-G, GFZ and ITSG Graz / University of Bonn), resulting in German-wide TWS trends of -0.7 to -1.3 Gt/year for this period. Due to the measurement and processing principles, satellite gravimetry also captures mass changes beyond the area of interest, so that Alpine glacier mass loss leads to spuriously more negative TWS trends for Germany, which were corrected in the present analysis. The spread of results based on different data products illustrates the uncertainty of GRACE data so that a comparative analysis of different data sets is recommended. The markedly different results of the JPL-Mascons data set may be due to its processing method that differs from the other data sets in several aspects. In view of extreme positive TWS anomalies in 2002 due to high rainfall and very negative anomalies in the drought years 2018 and 2019, the resulting trend values are strongly dependent on the selected time period. A longer TWS time series for Germany simulated with a hydrological model shows a good correspondence to the TWS observations and indicates that the trend values for the period of satellite gravimetry are not representative of the long-term dynamics. Extrapolating future water storage trends from them is thus not recommended.

Keywords: Water storage, water balance, extreme events, remote sensing, gravimetry

1 Einführung

Eine Reihe von Jahren mit unterdurchschnittlichen Jahresniederschlägen und überdurchschnittlichen Lufttemperaturen gingen in weiten Teilen Europas seit 2018 einher mit tiefgründig trockenen Böden, sinkenden Wasserständen in Oberflächengewässern sowie im Grundwasser und mit andauernden und extremen Niedrigwasserbedingungen im Gewässernetz. Die Dürrebedingungen waren und sind in ihrer räumlichen Ausdehnung und Dauer außergewöhnlich und führten verbreitet zu erheblichen Schäden für die Ökosysteme sowie zu wirtschaftlichen Schäden in der Land- und Forstwirtschaft und in weiteren Sektoren (BLAUHUT et al., 2022; RAKOVEC et al., 2022; THONFELD et al., 2022). Diese Entwicklungen der letzten Jahre haben nicht zuletzt in Deutschland zu einer breiten und lebhaften öffentlichen und medialen Diskussion über den Zustand und die künftige Verfügbarkeit der Wasserressourcen in Deutschland geführt.

Die Grundlage dieser Diskussionen sind einerseits die weithin möglichen, jedoch teils subjektiven Beobachtungen der Bevölkerung zu den verschiedensten trockenheitsbedingten Umweltfolgen. Andererseits liefern die Zeitreihen der amtlichen meteorologischen und hydrologischen Messnetze eine zwar punktbezogene, aber in der Gesamtheit räumlich umfassende Information zum Verlauf und Zustand einzelner Variablen des Wasserkreislaufs. Die Auswirkung von Trockenheits- und Dürreperioden auf großräumige Muster und Dynamiken der Bodenfeuchte, der Grundwasser- und Oberflächenwasserspeicherung in Deutschland wurden in den letzten Jahren in modell- und beobachtungsbasierten Studien analysiert (HELLWIG et al., 2020; TIJDEMANN & MENZEL, 2021; RINKE et al., 2021; WIELAND & MARTINIS, 2021). Eine hohe Aufmerksamkeit in der öffentlichen Darstellung haben weiterhin modellbasierte Produkte zu deutschlandweiten flächendeckenden Bodenfeuchtebedingungen erfahren, hierbei insbesondere der Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (ZINK et al., 2016; BOEING et al., 2022). Auf nationaler Ebene ist hier auch der Bodenfeuchteviewer des Deutschen Wetterdienstes¹ und auf der europäischen Ebene das auf Modell- und Satellitendaten basierende European Drought Observatory (EDO, CAMMALLERI et al., 2021)² als Informationsquellen zu nennen.

Die öffentliche Diskussion zur Wasserverfügbarkeit in Deutschland wurde nicht zuletzt durch eine TV-Reportage im März 2022³ verstärkt, in der Prof. Famiglietti (Global Institute for Water Security der kanadischen University of Saskatchewan) auf Basis von Daten der Satellitenmissionen GRACE und GRACE-FO einen Rückgang der Wasserspeicherung in Deutschland in den vergangenen zwanzig Jahren um jährlich etwa 2,5 Kubikkilometer darstellt, was insgesamt im genannten Zeitraum in etwa dem Volumen des Bodensees entsprechen würde. Mit der Satellitengravimetrie (GRACE, GRACE-FO) steht in Ergänzung zu den weiter oben genannten Informationsquellen eine weitere beobachtungsbasierte Datenbasis zur Verfügung, die großräumige und integrative Informationen über den Zustand der Wasserspeicherung in Deutschland liefert. Da diese Methodik in der deutschen

Öffentlichkeit und im Wasserfach selbst bisher vergleichsweise wenig bekannt ist, sollen mit dem vorliegenden Beitrag zunächst die Methodik sowie die Potenziale und Einschränkungen der Satellitengravimetrie für hydrologische Anwendungen einem Fachpublikum außerhalb der Geodäsie verständlich vorgestellt werden. Mit einer unabhängigen wissenschaftlichen Analyse der Daten werden dann im Folgenden die vorgenannten Aussagen von Prof. Famiglietti eingeordnet und diskutiert und neue wissenschaftliche Evidenz zu den Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland als Grundlage für die weitere öffentliche und fachspezifische Diskussion vorgelegt.

2 Methodik

2.1 Satellitengravimetrie

Das Messprinzip der Satellitengravimetrie besteht darin, dass die räumlichen und zeitlichen Abweichungen von Satellitenbahnen von vorhergesagten theoretischen Bahnen, im einfachsten Fall Ellipsen, präzise vermessen werden. Zu solchen Abweichungen kommt es aufgrund der gravitativen Wirkung von Massenunregelmäßigkeiten und Massentransporten an der Erdoberfläche und im Erdinnern. Die Analyse von Bahnstörungen ermöglicht es daher, die Struktur des Erdschwerefelds in Raum und Zeit abzuleiten und daraus dann Massenumverteilungen zu quantifizieren.

Zu diesem Zweck wurde im März 2002 das Satellitenpaar GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment; TAPLEY et al., 2019) als Gemeinschaftsprojekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der NASA in den Orbit gebracht, welches bis zum Juni 2017 kontinuierlich Daten lieferte. In Folge des großen wissenschaftlichen Erfolgs der Mission und um eine fortgesetzte Beobachtung auf klimatisch relevanten Zeitskalen zu ermöglichen, wurde im Mai 2018 vom Deutschen GeoForschungs Zentrum GFZ und der NASA die Nachfolgemission GRACE-FO (GRACE Follow-on; LANDERER et al., 2020) realisiert. Das GFZ ist bei beiden Missionen über das deutsch-amerikanische "Science Data System", dessen Hauptaufgabe das Prozessieren der GRACE/GRACE-FO-Daten, deren Verteilung und Archivierung ist, unmittelbar in die Auswertung der Messdaten involviert. Die Universität Bonn beteiligt sich mit der Weiterentwicklung von Analyseverfahren und der Integration der Daten in numerische Modelle.

Die Missionen GRACE und GRACE-FO bestehen aus zwei jeweils baugleichen Satelliten, die in einem Abstand von etwa 220 km auf der gleichen polaren Umlaufbahn von zu Beginn etwa 490 km Höhe um die Erde fliegen. Die Satelliten umrunden die Erde auf einer polaren Umlaufbahn in etwa 95 Minuten und etwa 460-mal in einem Monat. Die Wiederholzeiten der dazugehörigen Bodenspuren der Satelliten (die Projektion des Orbits auf die rotierende Erdoberfläche) sind dabei räumlich und zeitlich nicht konstant. Die polare Bahn bewirkt, dass die Bodenspuren der Orbits in der Nähe der Pole näher zusammen liegen als am Äquator. Da die Satelliten nicht aktiv auf vorgeschriebene Bahnen gehalten werden, sondern sich auf einer freien Umlaufbahn unter dem Einfluss des Erdschwerefeldes bewegen, ist der räumliche Abstand von benachbarten Bodenspuren an einer bestimmten geografischen Breite zeitlich auch nicht konstant. Bei GRACE-FO liegen sie bisher über Deutschland zwischen 48 km (August 2021) und 146 km (Januar 2020)⁴. In seltenen Fällen während der GRACE-Mission

1 https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/5_bofeview/_node.html

2 <https://edo.jrc.ec.europa.eu>

3 "Bis zum letzten Tropfen – Die Doku", Das Erste, 16. März 2022, ab Minute 24:20

4 Für Beispiele der Bodenspuren in Europa siehe <https://www.gfz-potsdam.de/grace#c12069>

überfliegen die Satelliten das Gebiet im zeitlichen Abstand von bis zu wenigen Tagen auf sich wiederholenden Bahnen, sodass die räumlichen Abstände dieser Bodenspuren dann noch etwas größer sind. Jeder Satellit ist mit einem GPS (Global Positioning System) Empfänger zur Positionsbestimmung und zeitlichen Referenzierung der Messdaten sowie einem dreiachsigen Beschleunigungsmesser für die direkte Ausmessung der nicht-gravitativen Störkräfte, verursacht durch die Reibung in der Restatmosphäre oder den Strahlungsdruck der Sonne, ausgestattet. Sternenkameras und zusätzliche Trägheitssensoren dienen zur Bestimmung der Satellitenlage im Raum.

Herzstück ist ein auf Mikrowellen (K/Ka-Band) basierendes Instrument, das kontinuierlich den Abstand beider Satelliten bis auf einige tausendstel Millimeter genau misst. Auf GRACE-FO wurde zusätzlich als Technologie-Demonstrator für künftige Schwerefeldmissionen ein "Laser Ranging Interferometer" (LRI) installiert, welches das Messrauschen der Abstandsmessung um mindestens den Faktor 100 gegenüber GRACE verkleinert (ABICH et al., 2019). Diese Abstandsmessung zwischen den Satelliten ist essentiell für die Bestimmung der hochgenauen Erdschwerefelder, weil Massenvariationen vor allem Änderungen der Bahngeschwindigkeit der Satelliten bewirken. Da nun beide Satelliten entlang des gleichen Orbits etwas zeitversetzt (ca. 30 Sekunden) dieser Bahnstörung ausgesetzt sind, ändert sich deren relative Geschwindigkeit Δv kontinuierlich (Abb. 1). Dies führt zu kleinen Entfernungsänderungen zwischen beiden Satelliten, die mit dem Mikrowelleninstrument oder dem LRI kontinuierlich gemessen werden. Damit enthalten die Abstandsmessungen Informationen über geringste Unterschiede im Schwerepotenzial U bzw. damit einhergehender Massenanomalien auf (z. B. Eismassen) und unter der Erdoberfläche (z. B. Grundwasser). Üblicherweise werden diese Beobachtungen über 30 Tage gesammelt und daraus ein mittleres Schwerefeldmodell für den Zeitraum eines Monats bzw. ca. 460 Erdumkreisungen abgeleitet. In einem weiteren Schritt kann dieses Schwerefeldmodell als Karte der monatlichen Massenänderungen, also der Massenunterschiede relativ zu einem langjährigen Mittel, dargestellt werden.

Abbildung 1 zeigt dies exemplarisch. Über der ruhigen Ozeanoberfläche ist die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Satelliten $v_A - v_B$ Null, da es in dem Beispiel auch keine (messbaren) Massendifferenzen gibt. Die Länge der (orangenen) Geschwindigkeitsvektoren ist identisch (Teilbild 1). Fliegt der erste Satellit A auf die Landfläche zu (Teilbild 2), bewirkt die Massen-anomalie in Form eines Berges eine Beschleunigung des Satelliten A. Der in 220 km nachfolgende Satellit B wird von dieser zusätzlichen Masse aber (noch) nicht beeinflusst und bleibt auf seiner Bahn scheinbar unbeschleunigt. Als Folge vergrößert sich die Geschwindigkeitsdifferenz, d. h., die Differenz der Geschwindigkeitsvektoren

$v_A - v_B$ ändert sich von Null auf einen positiven Wert. Im Teilbild 3 entfernt sich Satellit A wieder von der Massen-anomalie, wird also wieder langsamer. Satellit B hingegen wird stärker angezogen und vergrößert seine Geschwindigkeit, ähnlich wie Satellit A in Teilbild 2. Als Folge wird die Geschwindigkeitsdifferenz $v_A - v_B$ nun negativ. Im Teilbild 4 wird der ursprüngliche Zustand wie im Teilbild 1 wieder eingenommen, nachdem der nachfolgende Satellit durch die überflogene Massen-anomalie ebenfalls wieder auf die ursprüngliche Geschwindigkeit gebremst wurde und somit die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen beiden Satelliten über einer ruhigen Ozeanoberfläche wieder Null ist.

Damit ist es mit GRACE- und nun GRACE-FO-Daten erstmals möglich, monatliche, saisonale und auch längerfristige Massenveränderungen im Erdsystem zu beobachten. Allerdings ist aus Gründen des Messprinzips (u. a. polare Umlaufbahn und einhergehende Anisotropie der Abstandsbeobachtungen, ungenaue Messungen der zuvor beschriebenen nicht-gravitativen Beschleunigungen die an den Satelliten angreifen, und Fehler in den Modellen zur Korrektur sub-monatlicher Massenvariationen in der Atmosphäre oder im Ozean (FLECHTNER et al., 2016)) die räumliche Auflösung der GRACE- und GRACE-FO-Daten auf etwa 300 km beschränkt. Daher können die Kartenabbildungen in diesem Beitrag, solange sie alleine auf Daten der Satelliten-

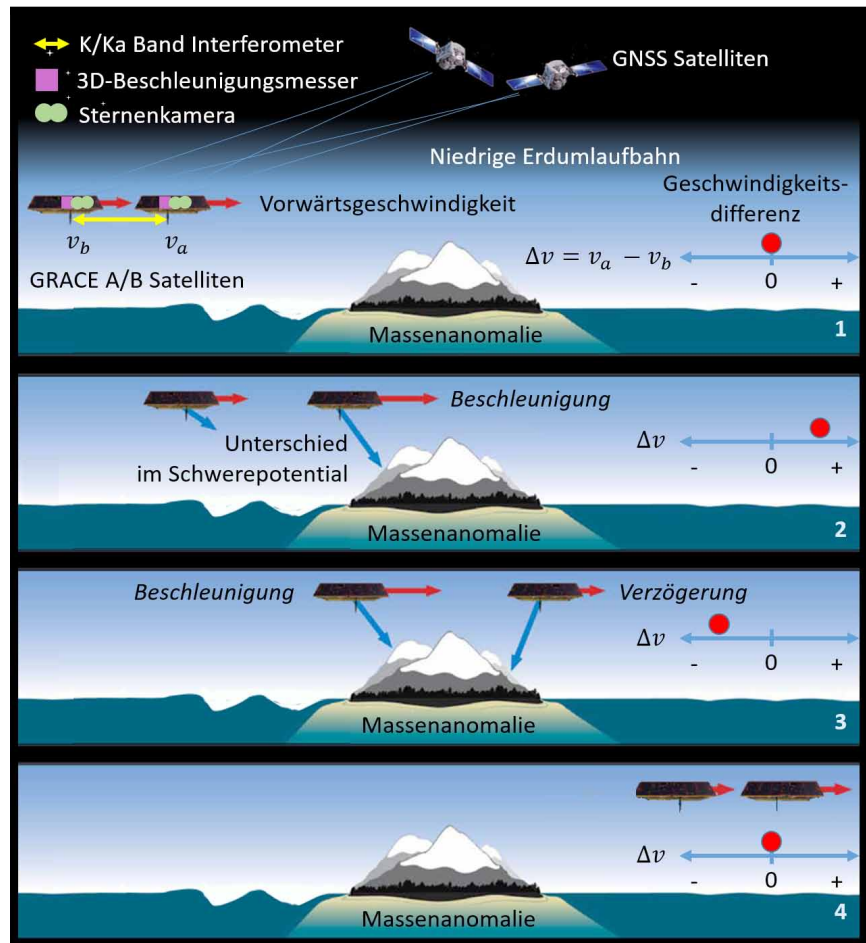


Abbildung 1
Das Messprinzip der Satellitengravimetriemissionen GRACE/GRACE-FO.
Measurement concept of GRACE/GRACE-FO.

missionen basieren, keine lokalen Details enthalten. Die Daten der Satellitengravimetrie müssen grundsätzlich als räumliche Mittelwerte verstanden werden. Damit ist gemeint, dass sich Wassermassenvariationen auf Skalen kleiner als etwa 300 km in den Daten herausmitteln. Jedoch können auch auf der Skale von 300 km je nach Region systematische Fehler wie das weiter unten angesprochene "Leakage" auftreten. Daher sind die Daten zum Beispiel für die Küstenregionen und insbesondere die Inseln Deutschlands weniger aussagekräftig. Auch ist zu beachten, dass die Satellitenmessungen den Rückgang von Alpengletschern beinhalten, welche wegen ihres Massenverlustes in der Mittelbildung über größere Regionen auch für Deutschland sichtbar werden können (siehe die Ergebnisse und Diskussion zu Abb. 7). Die Daten von GRACE und GRACE-FO beinhalten weiterhin geodynamische Effekte (z. B. Massenveränderungen aufgrund der postglazialen Landhebung in Nordeuropa), die bei der Prozessierung von Level-3-Daten für hydrologische Anwendungen (Kap. 2.2) noch reduziert werden müssen. Die Effekte zeitlich und räumlich hochfrequenter Luftmassenänderungen, Gezeiten und Meeresspiegelschwankungen (also beispielsweise in der Nord- und Ostsee) werden unter Nutzung von hochauflösenden Ozean- und Atmosphärenmodellen bereits bei der Verarbeitung der verschiedenen Satellitenbeobachtungen zu monatlichen Level-2-Schwerefeldmodellen in Form von Kugelfunktionskoeffizienten (Stokes-Koeffizienten) aus den Daten herausgerechnet (DAHLE et al., 2019). Diese Koeffizienten stellen das Schwerfeld als Funktion der Zeit und des Ortes als Reihenentwicklung bis zu einem bestimmten Grad n der Entwicklung dar. GRACE-Modelle werden typischerweise bis zum Grad 96 entwickelt (entspricht einer räumlichen Auflösung von etwa 200 km), wozu $(n+1)^2 = 9401$ Koeffizienten benötigt werden. Durch die notwendige räumliche Filterung geht anschließend jedoch wieder ein Teil der räumlichen Auflösung verloren.

Über den Kontinenten lassen sich somit Variationen der Gesamtwasserspeicherung (Terrestrial Water Storage, TWS) für Gebiete ab einer Größe von etwa 100.000 km² quantifizieren, also vorrangig die Veränderungen der Speicherkompartimente Schnee, Gletscher, Bodenfeuchte, Grundwasser und Oberflächengewässer. Die Größe TWS ist inzwischen als eine essentielle Klimavariablen (Essential Climate Variable, ECV) eingestuft (WMO, 2022). Die Genauigkeit der mithilfe von GRACE- und GRACE-FO-Daten abgeleiteten monatlichen TWS-Karten beträgt etwa 10 bis 20 mm Wasseräquivalent (WAHR et al., 2006; LANDERER & SWENSON 2012; VISHWAKARMA et al., 2018; BOERGENS et al., 2022). Hauptfehlerquellen sind ungenaue Messungen der zuvor beschriebenen nicht-gravitativen Beschleunigungen, welche an den Satelliten angreifen, und Fehler in den Modellen zur Korrektur sub-monatlicher Massenvariationen in der Atmosphäre oder im Ozean (FLECHTNER et al., 2016).

Darüber hinaus lassen sich in Kombination mit anderen Satelliten- oder Modelldaten aus der mittlerweile über 20 Jahre langen Zeitreihe für viele Regionen auch die durch Klimavariabilität, meteorologische Extreme und die menschliche Nutzung verursachten großräumigen Variationen der Grundwasserspeicherung beobachten (SHAMSUDDUHA & TAYLOR, 2020) sowie die Auswirkungen hydro-meteorologischer Extremereignisse analysieren (KUSCHE et al., 2016; GERDENER et al., 2020; BOERGENS et al., 2020a). Ebenso kann seit 2002 der Eismassenverlust in den Polargebieten und großer Gebirgsgletscher quantifiziert werden (WOUTERS et al., 2019). Damit lässt sich dessen massenbedingter

Beitrag zum Meeresspiegelanstieg direkt bestimmen und letztlich Abschätzungen des temperaturbedingten Anteils sowie der Wärmemengenänderung im Ozean verbessern (RIETBROEK et al., 2016; CAZENAVE et al., 2018). Weitere Anwendungen und Details finden sich in TAPLEY et al. (2019).

Zwischen den letzten GRACE-Messungen und dem Start von GRACE-FO liegt eine Lücke von elf Monaten, sodass kein direkter Vergleich der beiden Sensorsysteme möglich ist. Aufgrund des Messprinzips, welches metrologisch gut kontrolliert ist und keine Kalibration mittels terrestrischer Daten erfordert, gibt es keinen Anlass um von einem systematischen Offset zwischen den Zeitreihen auszugehen. Vergleiche mit unabhängigen geodätischen, hydrometeorologischen und ozeanographischen Mess- und Modellreihen (LÖCHER & KUSCHE, 2021; CHEN et al., 2021) deuten ebenfalls nicht auf systematische Unterschiede zwischen GRACE- und GRACE-FO-Daten hin.

2.2 GRACE/GRACE-FO-Datensätze

Die globalen monatlichen Schwerfeld Datensätze werden in Form von Level-2-Kugelfunktionskoeffizienten einem weltweiten Nutzerkreis durch drei offizielle GRACE/GRACE-FO-Analysezentren (Jet Propulsion Laboratory (JPL), Pasadena, USA; University of Texas Center for Space Research (UTCSR), Austin, USA; Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ) zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus werden an der Universität Bern im Rahmen des "International Combination Service for Time-variable Gravity Fields" (COST-G)⁵ der "International Association of Geodesy" (IAG)⁶ Services monatliche Schwerfeldlösungen von GFZ, JPL, UTCSR und vier weiteren Prozessierungszentren zu einem gemeinsamen Level-2-Produkt kombiniert (JÄGGI et al., 2020). Die Gewichtung der verschiedenen Lösungen erfolgt dabei anhand der von den Prozessierungszentren mitgelieferten Varianz-Kovarianz-Matrizen (MEYER et al., 2019). Die Nutzung aller Level-2-Produkte für hydrologische Anwendungen erfordert allerdings Kenntnisse in der physikalischen Geodäsie. So müssen verschiedene Korrekturen angebracht werden, wie etwa eine räumliche Filterung zur optimalen Trennung von Signal- und Rauschteilen in den Daten, der Ersatz von Kugelfunktionskoeffizienten, die entweder nicht oder nur schlecht durch GRACE/GRACE-FO bestimmt werden können, oder die Korrektur von Schwereffekten der postglazialen isostatischen Landhebung. Um den Kreis potenzieller Nutzer zu erweitern, wurden daher weltweit einige Datenportale aufgebaut, um sogenannte Level-3-Produkte in Form von globalen Rasterdatensätzen von TWS und von TWS-Zeitreihen für Einzugsgebiete oder Gletschersysteme zur Verfügung zu stellen. Hierzu gehört das am GFZ in Kooperation mit anderen Gruppen entwickelte operationell laufende Portal "Gravity Information Service"⁷ (GravIS) (BOERGENS et al., 2020b). Ebenso stellt auch die Universität Bonn derartige Level-3-Daten Nutzern zur Verfügung⁸, siehe weitere Details in den folgenden Abschnitten. Die Latenzzeit zwischen Datenaufnahme auf den Satelliten und Bereitstellung eines monatlichen Level-2 oder Level-3-Datensatzes beträgt gegenwärtig in etwa vier Monate. Da die Satellitengravimetrie lediglich Massenveränderungen im Erdsystem beobachten kann (und nicht die absolute Menge des gespei-

5 Internationaler Kombinationservice für zeitvariable Schwerfelder

6 Internationale Assoziation für Geodäsie

7 <http://gravis.gfz-potsdam.de/home>

8 https://www.apmg.uni-bonn.de/daten-und-modelle/grace_level3_monthly_solutions

cherten Wassers), ist es üblich, TWS als monatliche Anomalien gegenüber einem langjährigen Mittel darzustellen, entweder mit einer Masseneinheit (hier Gigatonnen, Gt) oder normiert auf die Fläche der betrachteten Regionen als Wasseräquivalent (mm).

In der hier vorliegenden Studie werden vier Level-3-Datensätze zur Analyse der Änderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) über Deutschland verwendet. Diese Datensätze werden im Folgenden mit GFZ, COST-G, ITSG/UB und JPL Mascons bezeichnet und ihre Prozessierung wird hier kurz beschrieben:

GFZ: Dieser Level-3-TWS-Datensatz basiert auf den sphärisch harmonischen Koeffizienten der Level-2-Daten des offiziellen GRACE/GRACE-FO-Analysezentrum GFZ Potsdam (Version GFZ RL06). Um hochfrequentes Rauschen in den Level-2-Schwerefelddaten zu reduzieren werden die Daten mit einer Kombination der beiden anisotropen Filter VDK3 und VDK5 (HORVARTH et al., 2018) nachbearbeitet. Schwereeffekte der post-glazialen Landhebung wurden mittels des Modells ICE-6G_D (VM5a) (PELTIER et al., 2018) korrigiert. Details zur Prozessierung dieses Datensatzes finden sich in DOBSLAW & BOERGENS (2020) sowie auf <http://gravis.gfz-potsdam.de/corrections>. Der Datensatz ist auf einem globalen 1-Grad-Gitter über das Gravis-Portal frei zugänglich.

COST-G: Dieser Level-3-TWS-Datensatz basiert auf den sphärisch harmonischen Koeffizienten des oben genannten Level-2-Kombinationsproduktes von COST-G (Version COST-G RL01). Die Prozessierung zu einem Level-3-Produkt ist identisch zum oben beschriebenen Datensatz GFZ (beide Version TWS v0004). Der Datensatz ist ebenfalls auf einem globalen 1-Grad-Gitter über das Gravis-Portal frei zugänglich.

ITSG/UB: Dieser an der Universität Bonn prozessierte Level-3-TWS-Datensatz basiert auf den Level-2-Daten "ITSG-2018 GRACE" und den operationellen GRACE-FO-Daten der Technischen Universität Graz (KVAS et al., 2019; MAYER-GÜRR et al., 2018). Die sphärisch harmonischen Koeffizienten (bis Grad und Ordnung 96) wurden dann mit einem anisotropen DDK3-Filter (KUSCHE, 2007; KUSCHE et al., 2009) geglättet um hochfrequentes Rauschen zu reduzieren. Effekte der post-glazialen Landhebung wurden ebenfalls korrigiert (A et al., 2013). Details der Prozessierung von ITSG/UB sind in GERDENER et al. (2022) zu finden. Der ITSG/UB-Datensatz auf einem globalen 0,5-Grad-Gitter ist über die Institutswebseite verfügbar.

JPL Mascons: Dieser Level-3-TWS-Datensatz wird vom offiziellen GRACE/GRACE-FO-Analysezentrum JPL erzeugt. Dieser Datensatz basiert, anders als die anderen drei hier verwendeten Datensätze, auf einem sogenannten Mascon-Ansatz zur Prozessierung von GRACE-Sensordaten. Dabei wird die gesamte Erdoberfläche mit flächengleichen Kugelkappen mit einem Durchmesser von 3 Grad abgedeckt, für die aus einer Analyse aller verfügbaren Schwerefeldbeobachtungen der vergangenen Jahre jeweils eine mittlere Schwankungsbreite des Signals berechnet wurde (WATKINS et al., 2015). Diese Signalvariabilität wird nachfolgend als stochastische Vorinformation für die Inversion der Sensordaten eines einzelnen Monats angesetzt. In einem weiteren Prozessierungsschritt werden die Daten unter Berücksichtigung der Geometrie von Küstenlinien (auf Land werden per se stärkere Schwankungen zugelassen) auf ein regelmäßiges 0,5-Grad-Gitter gesampelt und räumliche Leakage-Effekte unter Verwendung

des globalen Landoberflächenmodells CLM (OLESON et al., 2004, 2008) multiplikativ korrigiert (LANDERER & SWENSON, 2012). Weitere Prozessierungsdetails sowie eine umfangreiche Analyse der Genauigkeit der Mascon-Lösungen finden sich in WIESE et al. (2016). Die hier verwendete Version des JPL-Mascons-Datensatzes ist JPL Mascons v2.0.

Die TWS-Level-3-Datensätze werden auf einem globalem Gitter mit einer Auflösung von 1 Grad (GFZ und COST-G) bzw. 0,5 Grad (ITSG/UB und JPL-Mascons) bereitgestellt. Die Unsicherheit der TWS-Daten kann über Kovarianzmodelle (LANDERER & SWENSON, 2012; BOERGENS et al., 2022) oder über eine Varianzfortpflanzung formaler Unsicherheiten der Level-2-Daten (KVAS et al., 2019) geschätzt werden. In der vorliegenden Studie wurden die Unsicherheiten der GFZ- und COST-G-Datensätze mithilfe eines Kovarianzmodells geschätzt (BOERGENS et al., 2022). Dieses berücksichtigt dabei die räumlichen Abhängigkeiten von Fehlern in den GRACE-Beobachtungen, die sich aus der Anordnung der Satellitenbahnen ergeben. Daher ist das Kovarianzmodell sowohl anisotrop (richtungsabhängig) als auch inhomogen (breitenabhängig). Zusätzlich werden die Unterschiede in den Genauigkeiten der TWS-Daten in verschiedenen Monaten (zum Beispiel aufgrund einer unterschiedlichen Anzahl oder Verteilung der von den Satelliten aufgenommenen Daten) in der Unsicherheitsanalyse berücksichtigt, indem das Rauschen des residualen Signals über dem offenen Ozean, das nach der Reduktion aller nicht-hydrologischen Masseneffekte im Idealfall null sein sollte, genutzt wird. Die Genauigkeitsabschätzung für die Level-3-TWS-Datensätze der Universität Bonn folgt einem ähnlichen Ansatz (EICKER et al., 2014; GERDENER et al., 2022); auch hier sind zeitliche und örtliche Variationen der Genauigkeit aufgrund der GRACE-Bahncharakteristik und der Instrumentencharakteristik berücksichtigt.

Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, müssen die TWS-Daten von GRACE/GRACE-FO als räumlich geglättete Mittelwerte interpretiert werden. Da die Satelliten die Veränderung der Gravitationsfeldstärke "fühlen", die sich mit dem Quadrat des reziproken Abstandes von der Signalquelle nur graduell ändert (es gibt keine Begrenzung der Messrichtung wie etwa bei einer Antenne oder Kamera), kann die räumliche Zuordnung nur eingeschränkt aufgrund der Akkumulation monatlicher Daten über die gesamte Erde vorgenommen werden. Dies beinhaltet, dass Massensignale von außerhalb in das zu analysierende Gebiet hineingemittelt werden können sowie Massensignale von innerhalb des Gebietes nach außen scheinbar verloren gehen (WAHR et al., 1998). Für die hier verwendeten TWS-Daten von GFZ, COST-G und ITSG/UB wird dieser als Leakage bezeichnete Effekt mithilfe der Schwerefeldlösungen selbst abgeschätzt (DOBSLAW et al., 2020) und als Korrektur für die Berechnungen des Deutschlandmittelwertes angebracht. Die Leakage-Korrektur für den JPL-Mascons-Datensatz erfolgt über multiplikative Faktoren wie weiter oben erläutert. Alle hier eingesetzten Leakage-Korrekturen basieren auf dem Prinzip, dass das außerhalb des interessierenden Bereichs hervorgerufene Massensignal mithilfe von Vorwissen über das GRACE-Messsystem sowie mit geophysikalischen Modellen und/oder ergänzenden Beobachtungen approximiert werden kann. Die Qualität dieser Approximation ist aber stark von der räumlichen Signalverteilung abhängig, sodass die Angabe einer konkreten Maximaldistanz für Leakage-Einflüsse nicht möglich ist. Bei der Berechnung von (hinreichend großen) Gebietsmittelwerten werden Leakage-Effekte aus weiter entfernten Regionen effektiv unter-

drückt, in TWSA-Karten oder Mascons-Darstellungen ist dies jedoch nicht im gleichen Maße möglich.

Für die vorliegende Studie COST-G-Datensatz als den Referenzdatensatz, dem aufgrund seines Kombinationsansatzes das höchste Vertrauen zugewiesen wird, betrachtet. Beispielsweise zeigt dieser kombinierte Datensatz in JÄGGI et al. (2020) nicht nur im Spektralbereich, sondern auch für die Ableitung von Eismassentrends für Grönland oder der Antarktis die besten Ergebnisse (z. B. geringstes Rauschen) im Vergleich zu den individuellen Einzellösungen. Als Beispiel für die mögliche Streuung innerhalb der für COST-G verwendeten Einzellösungen werden hier zudem die TWS-Daten des GFZ betrachtet. Der ITSG/UB-Datensatz der Universität Bonn wurde unabhängig von COST-G analysiert und seine Abweichung dazu kann somit als ein unverzerrtes Maß für die Streuung aufgrund unterschiedlicher, aber ebenso plausibler Prozessierungsschritte dienen. Der JPL-Mascons-Datensatz wird explizit in die folgenden Analysen einbezogen, da er die Datengrundlage des eingangs erwähnten Beitrags zur Wasserverfügbarkeit in Deutschland von Prof. Famiglietti darstellt.

Bearbeitung der TWS-Zeitreihen

Alle hier verwendeten GRACE/GRACE-FO-Datensätze geben die monatlichen TWS-Anomalien gegenüber dem beliebig gewählten langjährigen Mittelwert von April 2002 bis März 2020 wieder. Aus allen GRACE/GRACE-FO-Datensätzen der TWS-Anomalien wurden monatliche Zeitreihen der Gebietsmittelwerte für Deutschland über eine flächengewichtete Mittelung oder Summation aller Gitterzellen Deutschlands berechnet. Dabei werden nur Gitterzellen berücksichtigt, deren Mittelpunkt innerhalb Deutschlands liegen. Neben diesen TWS-Monatszeitreihen wurden für alle Datensätze jeweils die um die mittlere Saisonalität reduzierten Monatszeitreihen bestimmt. Hierfür wird zur Schätzung des saisonalen Signals zunächst der langjährige lineare Trend nach der Methode der kleinsten Quadrate über die gesamte Zeitreihe geschätzt und von ihr abgezogen. Die Saisonalität wird dann als Mittelwert der Speicheranomalien der jeweiligen Monate über den gesamten Betrachtungszeitraum bestimmt und von den Zeitreihen abgezogen. Der zuvor bestimmte lineare Trend wird dann wieder addiert. Für jeden einzelnen Wert der TWS-Monatszeitreihen liegt eine Genauigkeitsabschätzung vor basierend auf dem oben bereits erwähnten Kovarianzmodell nach BOERGENS et al. (2022). Diese Standardabweichungen können mittels Varianzfortpflanzung in allen Prozessierungsschritten mitgeführt werden.

2.3 Niederschlagsdaten

Als wichtigste Größe zur Neubildung der kontinentalen Wasserspeicherung wird in dieser Studie der Niederschlag mit den GRACE-basierten TWS-Variationen verglichen. Zu diesem Zweck wurde der monatliche Niederschlagsdatensatz des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie des Deutschen Wetterdienstes (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) mit 1° Auflösung (SCHNEIDER et al., 2020) für dessen verfügbaren Zeitraum bis Dezember 2019 verwendet. Für den Zeitraum ab Januar 2020 wurden sogenannte First-Guess-Daten des GPCC (erste Abschätzung der globalen Verteilung der Niederschlagsmengen) verwendet, ebenfalls mit 1° Auflösung (ZIESE et al., 2011). Der First-Guess-Datensatz ist ab 2004 verfügbar, sodass die Kompatibilität der beiden Datensätze in der überlappenden Zeit verifiziert werden konnte. Neben der monatlichen Zeitreihe des Gebietsmittels des Niederschlags für Deutschland wird als Proxy für ein längerfristiges

Niederschlagsgeschehen auch die monatliche Zeitreihe der akkumulierten Niederschläge, die dem jeweiligen Monat über einen Zeitraum von 12 Monaten vorausgehen, betrachtet.

Um zusätzlich den möglichen Einfluss interannueller Variationen der Evapotranspiration sowie ihrer langfristigen Zunahme aufgrund steigender Lufttemperaturen auf TWS näherungsweise diskutieren zu können, wird in dieser Studie der Standardisierte Niederschlags-Verdunstungs-Index (SPEI) verwendet, der vom Instituto Pirenaico de Ecología (Zaragoza, Spanien) mit einer räumlichen Auflösung von 0,5 Grad zur Verfügung gestellt wird (VICENTE-SERRANO et al., 2010) und auf Niederschlags- und Evapotranspirationsdaten des Klimaforschungsinstituts Climatic Research Unit, University of East Anglia (HARRIS et al., 2021) basieren. Er repräsentiert einen statistischen Index, der für einen bestimmten Ort und Zeitpunkt die klimatische Wasserbilanz (Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung) über einen gewissen zurückliegenden Zeitraum akkumuliert und mit der langjährigen mittleren klimatischen Wasserbilanz an diesem Ort vergleicht. Daher wird der SPEI oft auch zur Indizierung und Charakterisierung von Dürreperioden eingesetzt. wird der SPEI mit einer monatlichen Auflösung und einer Akkumulationszeit von 12 Monaten (SPEI12) genutzt. Um eine direkte Vergleichbarkeit mit dem Niederschlag zu ermöglichen, wird neben dem SPEI auch dessen ausschließlich auf Niederschlagsdaten basierendes, ansonsten identisch berechnetes Äquivalent SPI (Standardisierter Niederschlags-Index, MCKEE et al., 1993), ebenfalls mit einer Akkumulationszeit von 12 Monaten (SPI12), verwendet. Es ist zu ergänzen, dass die so für Deutschland resultierende SPI-Zeitreihe in ihrem Verlauf identisch ist zu der oben erwähnten über 12 Monate akkumulierten Niederschlagszeitreihe.

2.4 Simulationsbasierte TWS-Zeitreihe

Um Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) großräumig über den Beobachtungszeitraum der Satellitengravimetrie hinaus zu betrachten, bieten sich regionale Klima- und Landoberflächenmodelle beziehungsweise integrierte hydrologische Modelle an. Dabei kommen nur Modelle infrage, die die Gesamtwasserspeicherung inklusive Grund- und Oberflächenwasser umfassend darstellen, um somit mit dem GRACE-basierten TWS-Daten konsistent zu sein. Das Modellsystem "Terrestrial Systems Modelling Platform" (TerrSysMP) (GASPER et al., 2014; SHRESTHA et al., 2014) kombiniert das hydrologische Modell ParFlow (KOLLE & MAXWELL, 2006; MAXWELL, 2013), das Landoberflächenmodell CLM (OLESON et al., 2004, 2008) und das atmosphärische Modell COSMO (BALDAUF et al., 2011) zu einem voll gekoppelten Modellsystem, das den Wasserkreislauf vom Grundwasser bis zur Wolkenobergrenze simuliert. Das Modell ParFlow simuliert die variabel gesättigte Grundwasserströmung mit der 3D-Richards-Gleichung sowie den Abfluss an der Oberfläche mithilfe der Approximation einer kinematischen Welle. In CLM wird die Landoberfläche inklusive der Schneebedeckung unter Berücksichtigung verschiedener Landbedeckungstypen abgebildet. Die Simulation von Niederschlag erfolgt durch COSMO. Mit dem vorliegenden Modell wird Europa mit der Ausdehnung und Auflösung der Euro-CORDEX-Initiative⁹ im Zeitraum von 1979 bis 2021 mit einer Auflösung von 12,5 km simuliert. Die meteorologischen Randbedingungen werden an den Modellrändern durch das Reanalyse-Produkt ERA5 (HERSBACH et al., 2020) vorgegeben. ParFlow simuliert den Untergrund in

⁹ <https://www.euro-cordex.net/>

15 Schichten bis zu einer Tiefe von 57 m. Innerhalb der Simulationsregion ist das Modell nicht an ERA5 gebunden und wird nicht mit GRACE-Daten kalibriert. Somit können sich Interaktionen zwischen Untergrund und Atmosphäre frei in der Simulation entwickeln, anthropogene Entnahmen von Oberflächen- und Grundwasser sind hingegen nicht abgebildet. Weitere Details der Simulation und ein bereits erfolgter Vergleich zu GRACE finden sich in FURUSHO-PERCOT et al. (2019). Da die Prozesse im Grundwasser und Oberflächenwasser in CLM sehr vereinfacht abgebildet werden, werden die entsprechenden Variablen der Wasserspeicherung hier aus Parflow verwendet. Um TWS aus TerrSysMP zu betrachten, werden somit die Wasserspeicherung der 15 Schichten, das Oberflächenwasser von ParFlow und das Schneewasseräquivalent aus CLM aufsummiert. Die Simulationsdaten werden mithilfe bilinearer Interpolation auf das 1-Grad-Gitter der GRACE-Daten gebracht.

2.5 Gletschermassenvariationen

Trotz der geringen Ausdehnung gletscherbedeckter Flächen in der Untersuchungsregion Deutschland kann der langfristige Massenverlust der Alpengletscher in Österreich und der Schweiz wie in Kapitel 2.2 erwähnt aufgrund der räumlichen Leakage-Effekte in den GRACE-TWS-Daten für Deutschland eine Rolle spielen. Zur Abschätzung dieses Einflusses werden hier deshalb jährliche beobachtungsbasierte Gletschermassenänderungen des "World Glacier Monitoring Service" im "Copernicus Climate Change Service" (WGMS, ZEMP et al., 2019) verwendet, die hier auf einem globalen 0,5-Grad-Gitter für den Zeitraum 2002-2020 zur Verfügung standen. Um eine den gefilterten GRACE-Rasterdaten angenäherte räumliche Auflösung und Glättung zu erzeugen, wurde auf den Gletscher-Datensatz ein der GRACE-Prozessierung ähnlicher räumlicher Filter angewandt (Kap. 2.2, Gauß-Filter mit einer Filterbreite von 250 km).

3 Ergebnisse und Diskussion

Aus den in Kapitel 2.2 vorgestellten GRACE- und GRACE-FO-Datensätzen wurden die Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) in Deutschland im Zeitraum April 2002 bis März 2022 bestimmt. Aus allen GRACE/GRACE-FO-TWS-Datensätzen wurden dazu monatliche Zeitreihen der Gebietsmittelwerte für Deutschland berechnet (Kap. 2.2). Dies erfolgte ebenso für die später zum Vergleich verwendeten Datensätze von Niederschlag, SPEI, TWS-Modelldaten und Gletschermasseneffekten. Die aus den vier GRACE/GRACE-FO-Beobachtungsdatsätzen resultierenden Zeitreihen sind in Abbildung 2 dargestellt. Für COST-G sind zusätzlich die Unsicherheitsbalken (1-Sigma) gezeigt. TWS weist eine ausgeprägte Saisonalität sowie deutliche interannuelle Variationen auf. Über weite Teile des Beobachtungszeitraums, insbesondere in den mittleren Jahren zwischen 2004 und 2015, stimmen die Zeitreihen der vier Datensätze gut überein, insbesondere unter Berücksichtigung der angezeigten Unsicherheitsbereiche (Abb. 2 oben).

Auch die TWS-Jahresgänge sind bei allen Datensätzen im zeitlichen Verlauf ähnlich (Abb. 3), mit dem Speichermaximum im Februar und dem Minimum im September, nur in für JPL-Mascons ist der Jahresgang in etwa um einen Monat nach hinten verschoben. Die saisonalen Amplituden von TWS variieren hingegen recht deutlich zwischen den Datensätzen. Mit 33,4 Gt liegt COST-G ungefähr in der Mitte der anderen Datensätze (Tab. 1). Eine Massenänderung von 1 Gt entspricht für die

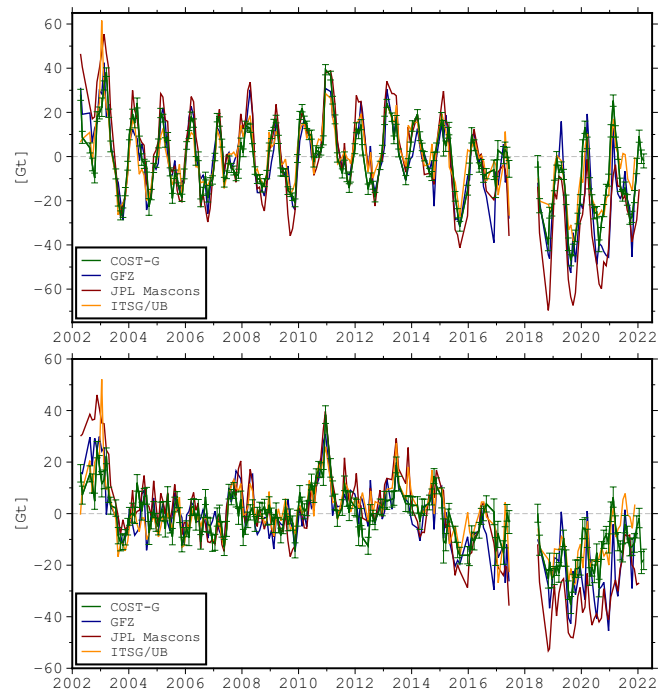


Abbildung 2
Veränderungen der Gesamtwasserspeicherung (TWS) für Deutschland aus vier Datensätzen der Missionen GRACE/GRACE-FO; Gesamtsignal (oben) und nach Abzug der mittleren Saisonalität (unten). Variations of terrestrial water storage (TWS) in Germany from four GRACE/GRACE-FO data sets; total signal (upper plot) and after reduction of the mean seasonality (lower plot).

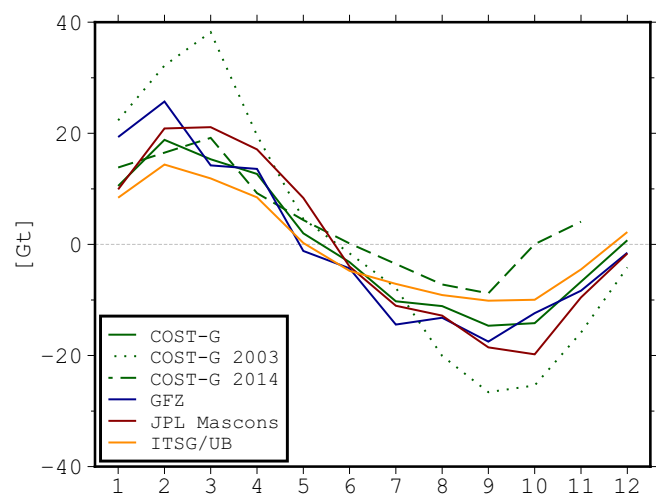


Abbildung 3
Mittleres Jahressignal (2002-2021) der Gesamtwasserspeicherung (TWS) in Deutschland von vier Datensätzen der Missionen GRACE/GRACE-FO. Für den COST-G-Datensatz ist zusätzlich der Jahresgang des Jahres mit der größten (2003, gepunktete Linie) und der kleinsten (2014, gestrichelte Linie) Jahresamplitude dargestellt. Mean seasonality (2002-2021) of terrestrial water storage (TWS) in Germany based on four GRACE/GRACE-FO data sets. For COST-G, also the years with the largest seasonal amplitude (2003, dotted line) and the smallest annual amplitude (2014, dashed line) are shown.

Tabelle 1
Amplitude und Phase des mittleren Jahresgangs von TWS für Deutschland (Zeitraum 2002–2021) sowie maximale und minimale Jahresamplitude im Beobachtungszeitraum.
Amplitude and phase of the mean TWS seasonality in Germany (period 2002–2021) and the largest/smallest seasonal amplitude in the observation period.

	Mittlere Amplitude		Minimum Monat	Maximum Monat	maximale Amplitude [mm] (Jahr)	minimale Amplitude [mm] (Jahr)
	[Gt]	[mm]				
COST-G	33,4	93,5	September	Februar	181,4 (2003)	78,4 (2014)
GFZ	43,2	121,0	September	Februar	330,7 (2003)	94,1 (2013)
ITSG/UB	24,5	68,6	September	Februar	251,7 (2003)	70,6 (2006)
JPL Mascons	40,9	114,5	Oktober	März	225,1 (2003)	86,5 (2014)

Fläche Deutschlands einer Wasserspeicheränderung von 2,8 mm Wasseräquivalent; die entsprechenden Werte in mm sind ebenfalls in Tabelle 1 angegeben. Die Jahresamplitude von TWS variiert deutlich von Jahr zu Jahr und beträgt beispielsweise für den COST-G-Datensatz im Jahr mit den geringsten Variationen.

Die interannualen TWS-Variationen und Extremereignisse treten deutlicher hervor, nachdem der Jahresgang aus den Zeitreihen reduziert wurde (Abb. 2 unten). Der Jahresgang wurde hier mit dem Mittelwert des jeweiligen Monats angenähert und gemeinsam mit dem langjährigen linearen Trend für jede Zeitreihe über ein Kleinst-Quadrat-Verfahren geschätzt. Starke positive Anomalien der Wasserspeicherung sind im Jahr 2002 zu erkennen. Nach den großen Hochwasserereignissen an Elbe und Donau im August 2002 führten hohe Niederschlagsmengen bis zum Jahreswechsel Anfang 2003 zu einem weiteren Anstieg der Wasserspeicherung und der TWS-Anomalien. Der trockene Hitzesommer 2003 verursachte anschließend eine schnelle Abnahme der Gesamtwasserspeicherung in Deutschland und im Spätsommer bereits wieder negative Anomalien der Wasserspeicherung. Die folgenden Jahre waren bis 2015 durch ein insgesamt stabiles Niveau von TWS geprägt. Deutlich treten jedoch positive Anomalien während des schneereichen Winters 2010/11 und im Zuge der Hochwasserereignisse im Juni 2013 hervor. Nach 2015 wird von GRACE/GRACE-FO ein Rückgang von TWS in Deutschland beobachtet, deutlich verstärkt durch die Trockenjahre ab 2018. Die unterdurchschnittlichen Niederschläge der Jahre 2018 bis 2020 führten zu einer Periode mit dem geringsten TWS im Beobachtungszeitraum. Das Minimum von TWS wurde gemäß der COST-G Daten im August 2019 erreicht, mit einem Defizit von 47,0 Gt (131 mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel. Das regenreichere Jahr 2021 führte zu einem Anstieg des Gebietsmittels von TWS in Deutschland, sodass zumindest im Winter das langjährige TWS-Mittel wieder überschritten wurde. Für die genannten Extremereignisse zeigen sich zumeist die größten Abweichungen zwischen den verschiedenen GRACE-Datensätzen, wobei vor allem die JPL-Mascons-Daten deutlich größere Amplituden aufweisen als die Daten von GFZ, COST-G und ITSG/UB. Ein möglicher Grund hierfür wird in den unterschiedlichen Prozessierungsansätzen vermutet. So führt beispielsweise die hier in identischer Weise wie in den Analysen von Prof. Famiglietti¹⁰ berücksichtigte Nachbearbeitung der JPL-Daten mit einer multiplikativen Korrektur der Leakage-Effekte zu einer Verstärkung der Extremwerte, insbesondere zu Beginn und Ende der TWS-Zeitreihe und damit zu einem größeren Trendwert.

10 "Bis zum letzten Tropfen – Die Doku", Das Erste, 16. März 2022, ab Minute 24:20

Für die beiden feuchtesten (November 2002) und trockensten (August 2019) Perioden im Beobachtungszeitraum gemäß des deutschlandweiten TWS-Gesamtsignals ist die räumliche Verteilung der TWS-Anomalien basierend auf dem COST-G-Datensatz zum Zeitpunkt ihrer jeweiligen maximalen Ausprägung in Abbildung 4 dargestellt. Die monatlichen Anomalien beschreiben die Abweichung vom langjährigen TWS-Mittelwert des jeweiligen Monats einer jeden 1-Grad-Rasterzelle. Insgesamt veranschaulicht der räumlich glatte Verlauf von TWS die grobe regionale Auflösung der GRACE/GRACE-FO-Beobachtungen mit der keine kleinräumigen Details (etwa auf Landkreisebene) aufgelöst werden können. Im Herbst 2002 traten die größten Maxima der Wasserspeicherung insbesondere in Süddeutschland auf und erreichten Abweichungen von der mittleren Speicherfüllung im November von mehr als 100 mm. Es ist hervorzuheben, dass diese TWS-Situation auch das Witterungsgeschehen in den Monaten nach den Hochwasserereignissen an Donau und Elbe im August 2002 abbildet. Die Trockenperiode seit 2018 ist zum Zeitpunkt des deutschlandweiten TWS-Minimums im August 2019 gemäß der GRACE-FO-Daten am stärksten in Ostdeutschland und in einem Streifen Richtung Südwest-Deutschland und Frankreich ausgeprägt. Die anderen hier analysierten TWS-Datensätze zeigen ähnliche räumliche Muster. In der Differenz zwischen den beiden Extremmonaten sieht man, dass in Norddeutschland entlang der Küsten die geringste Variabilität im Gesamtwasserspeicher zu beobachten ist. Die größten Variationen sind im Südwesten Deutschlands sichtbar.

Der Vergleich der zeitlichen Variabilität von TWS mit der monatlichen Zeitreihe der Gebietsmittel des Niederschlags in Deutschland zeigt erwartungsgemäß nur eine geringe Korrelation (Abb. 5 links). Der dominierende Jahresgang der TWS-Zeitreihe wird im Wesentlichen durch die Saisonalität der Verdunstung gesteuert. Im Winterhalbjahr findet tendenziell eine Speicherauffüllung durch Niederschläge statt, die die Verdunstungsraten übersteigen. Im Sommerhalbjahr führt hingegen die dem Niederschlag übersteigende Verdunstung zusammen mit dem Abfluss zu einer Speicherzehrung. Nach Abzug dieser saisonalen Effekte wird in den so reduzierten TWS-Zeitreihen die längerfristige Speicherwirkung des hydrologischen Systems deutlich, die in Deutschland überwiegend der Bodenfeuchte und dem Grundwasser zugeordnet werden kann. Die längerfristigen Variationen des Niederschlagsgeschehens in Deutschland, hier repräsentiert durch den jeweils über die letzten 12 Monate akkumulierten Niederschlag, korrelieren mit der Dynamik der um die Saisonalität reduzierten Wasserspeicherung basierend auf dem COST-G-Datensatz bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,68 moderat

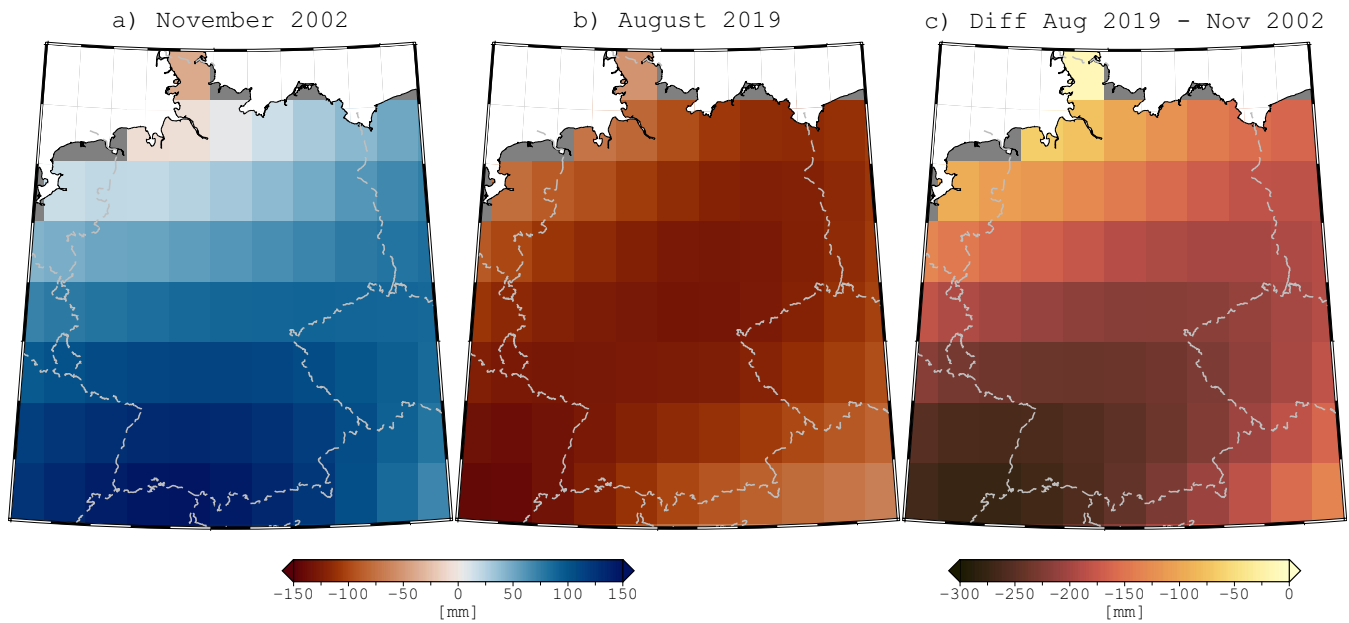


Abbildung 4

Räumliche Verteilung der Anomalien der Gesamtwasserspeicherung (TWS) für Deutschland aus GRACE/GRACE-FO (COST-G-Datensatz ohne Leakage-Korrektur) in den Monaten mit der größten positiven Anomalie (links) und der größten negativen Anomalie (Mitte) relativ zum langjährigen Monats-Mittelwert von TWS sowie die Differenz zwischen den beiden Monaten (rechts).

Spatial distribution of terrestrial water storage (TWS) anomalies in Germany from GRACE/GRACE-FO (COST-G data set without leakage correction) in the months with the most positive anomaly (left plot) and the most negative anomaly (centreplot) relative to the long-term mean monthly TWS, and the difference between both months (right plot).

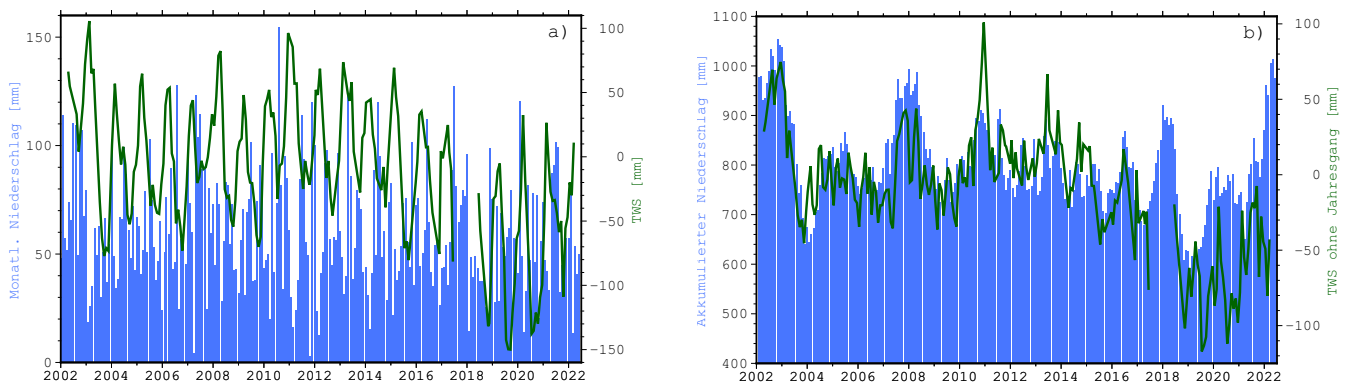


Abbildung 5

Monatliche Zeitreihen der Gebietsmittel von Niederschlag und TWS (COST-G-Datensatz) für Deutschland (links), monatliche Zeitreihen des über die vorherigen 12 Monate akkumulierten Niederschlags und von TWS ohne Jahresgang (rechts).

Monthly time series of the area averages of precipitation and TWS (COST-G data set) for Germany (left plot), monthly time series of accumulated precipitation over the preceding 12 months and TWS without seasonality (right plot).

bis hoch (Abb. 5 rechts). Deutlich ausgeprägt ist der Wechsel von positiven zu negativen Speicheranomalien im Übergang vom regenreichen Jahr 2002 zum Trocken- und Hitzejahr 2003. Eine niederschlagsreiche Periode in 2007 und 2008 führte erneut zu positiven TWS-Anomalien. Für die seit etwa 2015 tendenziell abnehmende Wasserspeicherung in Deutschland zeigt sich ein enger Zusammenhang mit abnehmenden Niederschlagssummen, unterbrochen durch eine niederschlagsreichere Periode in 2017, für die jedoch aufgrund der Datenlücke zwischen den Satellitenmissionen GRACE und GRACE-FO keine TWS-Beobach-

tungen vorliegen. Trotz der im Vergleich zu 2018 wieder etwas höheren Niederschläge im Folgezeitraum, insbesondere in 2021, wurde das langjährige (saisonal bereinigte) TWS-Defizit nicht wieder ausgeglichen (Abb. 5 rechts). Der zusätzliche Einfluss von Anomalien der Verdunstung auf diese Entwicklung wird bei der vergleichenden Betrachtung des SPEI12 und des SPI12 deutlich (Abb. 6). Die Wahl der Akkumulationszeiträume der beiden Indizes mit 12 Monaten folgt dabei der gleichen Argumentation wie weiter oben beim über 12 Monate akkumulierten Niederschlag. Beide Indizes weisen im gesamten Zeitraum seit 2018

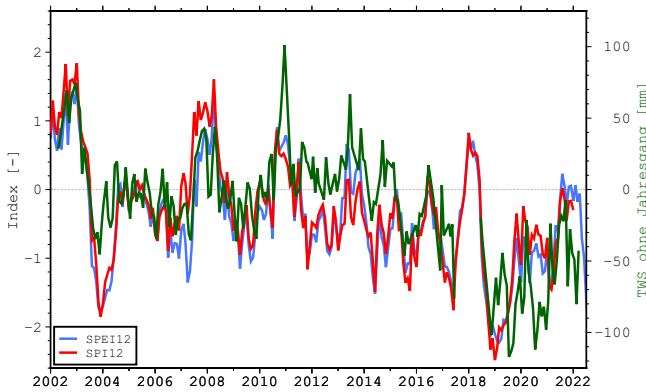


Abbildung 6
 Vergleich von Zeitreihen der Gebietsmittel für Deutschland von TWS ohne Jahresgang (COST-G-Datensatz), Niederschlagsindex SPI12 und Niederschlag-Evaporations-Index SPEI12.
Comparison of monthly area-average time series of Germany for TWS without seasonality (COST-G data set), the precipitation index SPI12 and with the precipitation-evaporation-index SPEI12.

bis auf wenige Monate im Sommer 2021 stets negative Werte auf, wobei der SPEI12 mit noch stärker negativen Werten in den Jahren 2019 und 2020 noch trockenere Bedingungen aufzeigt und somit den verstärkenden Effekt der Verdunstung auf die interannuelle TWS-Dynamik verdeutlicht. Dies wird auch belegt durch eine etwas höhere Korrelation der TWS-Zeitreihe von 2002 bis 2021 mit der SPEI-Zeitreihe (0,71) als mit der SPI-Zeitreihe (0,66).

Die langfristige Veränderung der Wasserspeicherung in Deutschland wird im Folgenden anhand der von GRACE/GRACE-FO beobachteten linearen Trends diskutiert. Diese wurden für alle vier hier verwendeten TWS-Datensätze auf der Basis der verfügbaren vollständigen hydrologischen Jahre berechnet, das heißt für den Zeitraum 11/2002 bis 10/2021. Für diesen 20-jährigen Beobachtungszeitraum zeigt der COST-G-Datensatz einen Rückgang der Wasserspeicherung in Deutschland von -0,76 Gt/Jahr (-2,1 mm/Jahr) (Tab. 2), entsprechend einem Gesamtvolumen von etwa 15,2 km³ Wasser. Im europäischen Vergleich sticht Deutschland damit allerdings nicht als ein "Hotspot" hervor (BOERGENS et al., 2020).

Aus den Unsicherheitsangaben der TWS-Monatswerte, wie sie in Abbildung 2 gezeigt werden, lässt sich ein Fehler der Trendschät-

Tabelle 2
 Trends der TWS-Gebietsmittel von Deutschland aus verschiedenen GRACE/GRACE-FO-Datensätzen (mit Leakage-Näherung) für den Zeitraum von 11/2002 bis 10/2021.
Trends of TWS area averages for Germany from different GRACE/GRACE-FO data sets (with leakage approximation) for the period from 11/2002 to 10/2021.

	Gt/Jahr	mm/Jahr
COST-G	-0,76 ± 0,03	-2,1 ± 0,08
GFZ	-1,31	-3,7
ITSG/UB	-0,69	-1,9
JPL Mascon	-2,39	-6,7

zung für den COST-G-Datensatz von +/-0.03 Gt/Jahr ableiten. In Anbetracht der deutlich größeren Unterschiede der geschätzten Trends zwischen den vier verschiedenen Datensätzen erscheint dieser rein statistische Unsicherheitswert eines Datensatzes jedoch zu optimistisch. Wenngleich alle analysierten Datensätze einen negativen TWS-Trend für Deutschland aufzeigen, sind die Unterschiede insbesondere zwischen den Daten nach COST-G, GFZ und ITSG/UB einerseits und dem JPL-Mascons-Datensatz andererseits groß (Tab. 2). Die Trendschätzung wird dabei stark von positiven Wasserspeicheranomalien zu Beginn des Trendzeitraums in 2002 und den negativen Anomalien zum Ende beeinflusst. Dies sind genau die Zeiträume, in denen die JPL-Mascons-Daten deutlich größere Anomalien in beide Richtungen aufweisen als die anderen Datensätze, wodurch der deutlich negativere Trendwert für JPL-Mascons verursacht wird.

Insbesondere der Rückgang der Gletschermassen der Alpen kann über das Leakage der Schwerefelddaten die Trendschätzungen von TWS für Deutschland beeinflussen. Der hier vorliegende Gletscher-Datensatz (Kap. 2.5) weist für den gesamten Alpenraum einen Rückgang der Gletschermassen von im Mittel 1,7 Gt/Jahr über den verfügbaren Zeitraum 2002 bis 2020 aus. Nach der Filterung der Gletscherdaten, die annähernd wiedergibt wie GRACE/GRACE-FO diese Gletschermassenveränderungen beobachtet (Kap. 2.5), ergibt sich ein negativer Trend in Süddeutschland, der Richtung Norden ausläuft (Abb. 7). Es kann somit davon ausgegangen werden, dass durch den Leakage-Effekt der Glet-

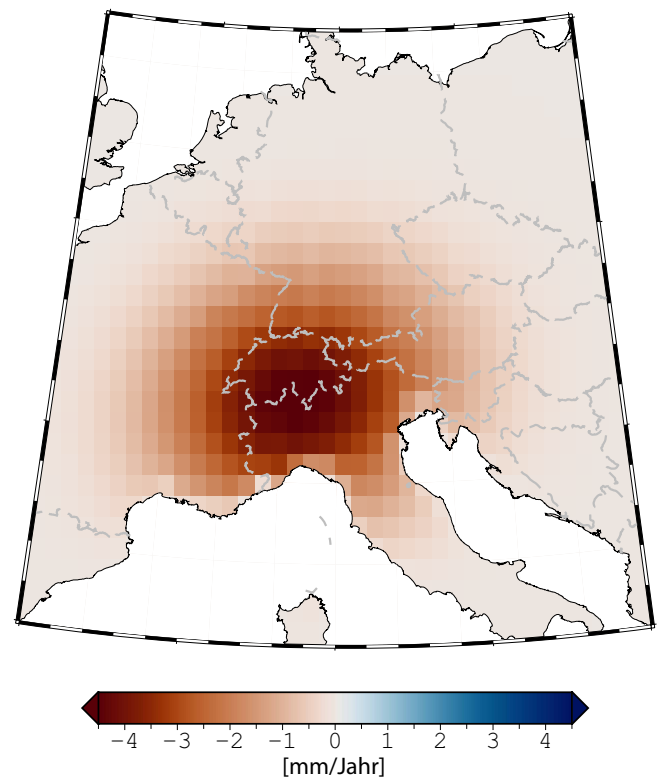


Abbildung 7
 Schätzung des Leakage-Effektes des Massenverlustes der Alpengletscher auf die umliegenden Regionen nach einer GRACE-ähnlichen räumlichen Filterung.
Estimation of the leakage effect of mass losses of Alpine glaciers on surrounding areas after GRACE-like spatial filtering.

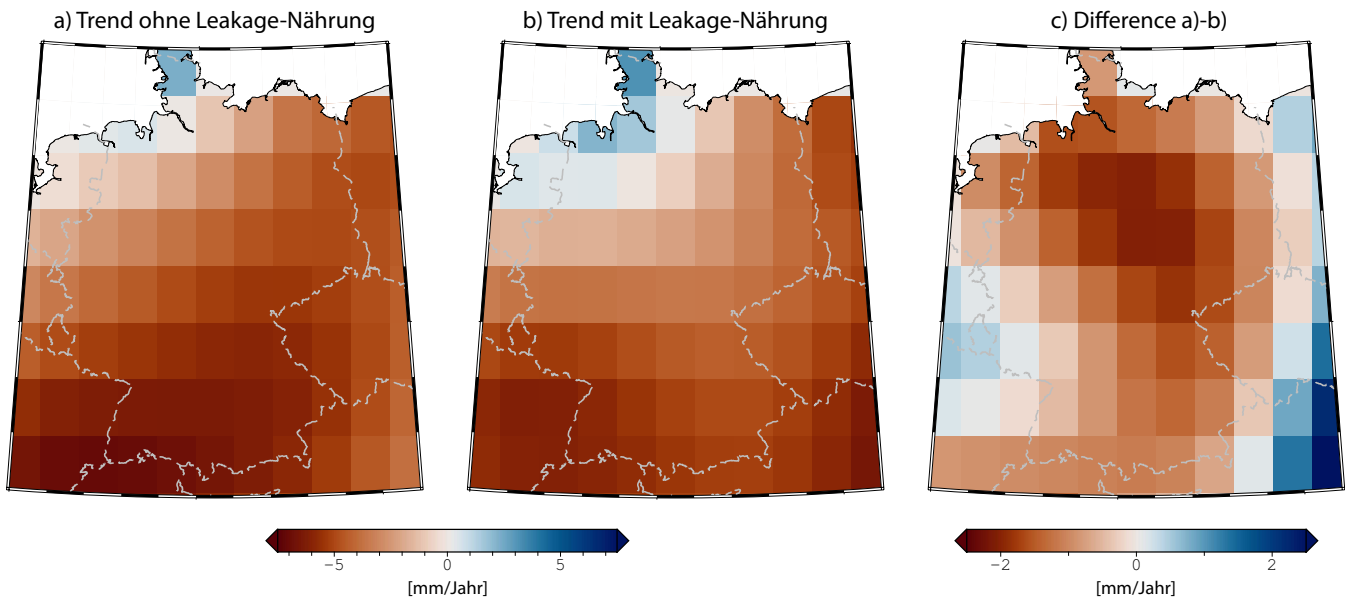


Abbildung 8

TWS-Trends basierend auf dem COST-G-Datensatz für den Zeitraum 11/2002 bis 10/2021 (links ohne Leakage-Näherung, Mitte mit Leakage-Näherung), und Differenz beider Karten (rechts).

TWS trends based on the COST-G data set for the period from 11/2002 to 10/2021 (left plot: without leakage approximation; middle plot: with leakage approximation), and the difference of both maps (right plot).

scherschmelze in den Alpen die TWS-Trends in Süddeutschland stärker negativ aus den GRACE-Daten geschätzt werden, als sie tatsächlich sind. Für das TWS-Gebietsmittel für Deutschland insgesamt ergibt die hier vorliegende Analyse, dass ein Trendanteil von -0,22 Gt/Jahr (0,6 mm/Jahr) auf das Leakage der Gletschermassenabnahme zurückzuführen ist. Daher sollte bei einer gebietsgemittelten Betrachtung der Wasserspeicherung für Deutschland die Leakage-Näherung angebracht werden. Für den COST-G-Datensatz modifiziert diese den TWS-Trend um +0,28 Gt/Jahr, liegt also in der Größenordnung des aus den beobachteten Gletschermassenverlusten geschätzten Leakage-Effektes.

Die räumliche Verteilung der COST-G-TWS-Trends über Deutschland und Umgebung zeigt die größte Abnahme im Südwesten, aber auch hohe Werte im gesamten süddeutschen Bereich und im Osten Deutschlands (Abb. 8). Die Leakage-Näherung führt insbesondere zu einer Verkleinerung der negativen TWS-Trends in Süddeutschland, die im Wesentlichen auf die Reduktion des Leakage-Effektes der alpinen Gletschermassenverluste zurückgeführt werden kann (Abb. 8c). Größere Veränderungen des Trends nach der Leakage-Näherung zeigen sich auch im zentralen Bereich Norddeutschlands. Insgesamt verringert sich der

TWS-Trend im Flächenmittel für Deutschland durch die Leakage-Näherung. Die zentrale Aussage ändert sich aber nicht wesentlich.

Wie weiter oben bereits angesprochen, haben die starken TWS-Anomalien zu Beginn und Ende des Untersuchungszeitraumes einen großen Einfluss auf die Trendschätzung. Die TWS-Trends der GRACE-Datensätze für verschiedene Zeiträume sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Für den Zeitraum mit vergleichsweise stabiler Wasserspeicherung zwischen den Jahren 2004 und 2017 unterscheidet sich der Trend der JPL-Mascons-Lösung bei insgesamt geringen Trends weniger deutlich vom Referenzdatensatz COST-G als für den Gesamtzeitraum. An den Trendwerten für Perioden ohne die ersten nassen oder die letzten trockenen Jahre zeigt sich, dass insbesondere die Trockenjahre ab 2018 die Trendschätzung maßgeblich beeinflussen.

Abbildung 9 stellt die monatlichen simulierten TWS-Anomalien von TerrSysMP (Terrestrial Systems Modelling Platform) von Anfang 1990 bis August 2021 dar. Die Erweiterung des Zeitraums ermöglicht die Betrachtung einer vollständigen Klimareferenzperiode, welche durch GRACE-Beobachtungen noch nicht ab-

Tabelle 3

Trends (in Gt/Jahr) der TWS-Gebietsmittel von Deutschland aus verschiedenen GRACE/GRACE-FO-Datensätzen mit Leakage-Näherung für unterschiedliche Zeiträume.

Trends (in Gt/year) of area-average TWS for Germany from different GRACE/GRACE-FO data sets with leakage approximation for different time periods.

	11/2022 bis 10/20121	11/2003 bis 10/2016	11/2003 bis 10/2021	11/2002 bis 10/2016
COST-G	-0,76	0,26	-0,73	0,07
GFZ	-1,31	-0,60	-1,22	-0,84
ITSG/UB	-0,69	0,70	-0,61	0,34
JPL Mascons	-2,39	-0,04	-2,40	-0,27

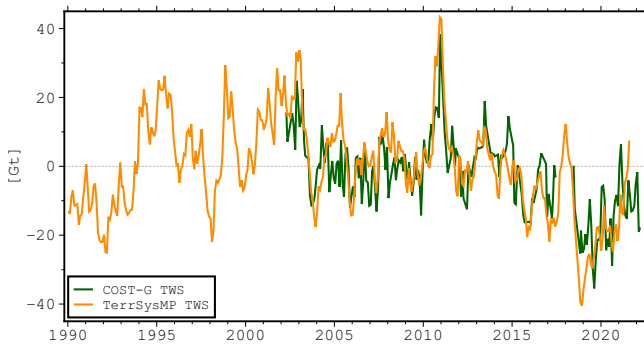


Abbildung 9

Monatliche TWS-Anomalien ohne Jahresgang als Gebietsmittel über Deutschland aus TerrSysMP und GRACE/GRACE-Beobachtungen (COST-G-Daten). Die Referenzperiode zur Berechnung der TWS-Anomalien ist für beide Zeitreihen 2002 bis 2020.

Monthly area-average TWS anomalies without seasonality for Germany simulated with TerrSysMP and observed with GRACE (COST-G data). The reference period for calculating the TWS anomalies is 2002 to 2020 for both time series.

gedeckt wird. TerrSysMP zeigt eine große Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Satellitengravimetrie auch während Extremereignissen wie den Dürren 2003 und 2018. Der Korrelationskoeffizient der monatlichen TWS-Zeitreihen von TerrSysMP und GRACE/GRACE-FO nimmt für den gemeinsamen Zeitraum 2002 bis 2021 den Wert 0,82 an. Die erweiterte Zeitreihe des Modells zeigt aber, dass die trockenen Jahre 2018/2019 als auch die sehr feuchten Jahre wie 2002 Extreme waren, die sich nicht in den Jahren von 1990 bis 2001 finden. Das wirkt sich auch auf die Trendberechnung aus: Über die GRACE-Jahre von 2002 bis 2021 ergibt sich aus TerrSysMP für Deutschland ein TWS-Trend von $-1,84 \text{ Gt/Jahr}$, erweitert man diese Analyse bis 1990, also über eine vollständige Klimareferenzperiode, ergibt sich hingegen nur noch ein Trend von $-0,42 \text{ Gt/Jahr}$.

4 Schlussfolgerungen

Die Satellitengravimetrie mit der aktiven Mission GRACE-Follow-On und der Vorgängermission GRACE stellt seit dem Jahr 2002 ein einzigartiges Beobachtungsverfahren für räumliche und zeitliche Variationen der kontinentalen Wasserspeicherung dar. Wie keine andere Technologie ermöglicht die Gravimetrie, die Speichervariationen in einer integrativen Weise über alle Speicherkompartimente des Wasserkreislaufs hinweg zu erfassen. Die Satellitengravimetrie bemisst direkt den über andere Beobachtungen oder Modelle nur schwierig quantifizierbaren Speicherterm $\Delta S = P - ET - Q$ (Speicheränderung = Niederschlag – Verdunstung – Abfluss) der Wasserbilanzgleichung. Sie liefert auf diese Weise einen fundamentalen Beitrag zum Schließen der Wasserbilanz und trägt zu einem umfassenden Verständnis des Wasserhaushaltes und zur Erfassung der gespeicherten Wasserressourcen bei. Methodisch bedingte Einschränkungen der Satellitengravimetrie sind in der gegenwärtigen Konstellation der Mission die geringe räumliche Auflösung und im Allgemeinen die Unschärfe in der Abgrenzung räumlich benachbarter Speicherveränderungen sowie die Notwendigkeit einer Signaltrennung. Letzteres bedeutet, dass sich Fehler in der Abtrennung der anderen von der Satellitengravimetrie erfassten nicht-hydrologischen Signalanteile, wie zum Beispiel Massen-

variationen in der Atmosphäre oder langfristige geodynamische Massenänderungen wie die postglaziale Landhebung, im Unsicherheitsbudget der resultierenden Wasserspeicheränderungen akkumulieren.

Die GRACE/GRACE-FO-Daten zeigen deutliche saisonale und interannuelle Variationen der Wasserspeicherung in Deutschland über die letzten 20 Jahre. Trocken- und Feuchtperioden mit besonders hohen und geringen Anomalien der Gesamtwasserspeicherung sind offensichtlich. Die beobachteten TWS-Anomalien in einzelnen Monaten oder Jahreszeiten von bis zu 40 Gt (110 mm) im Vergleich zum langjährigen Mittel entsprechen in etwa einer mittleren TWS-Jahresamplitude oder der Standardabweichung der Jahresniederschläge Deutschlands, bei einem Jahresniederschlag von im Mittel 797 mm (1981 bis 2010) (SCHÖNWIESE & TRÖMEL, 2011). Die generelle Dynamik dieser Variationen stimmt über alle GRACE/GRACE-FO-basierten Datenprodukte hinweg überein und ist auch zu Modellergebnissen sehr ähnlich. Die interannuellen Variationen der monatlichen Wasserspeicherung, die nach Abzug des Jahresgangs hervortreten, korrelieren in einem hohen Maße mit den akkumulierten Niederschlagssummen der vorangehenden 12 Monate. Die Verdunstung trägt nur einen vergleichsweise kleinen Teil zur Erklärung dieser Speichervariationen bei.

Die Gesamtwasserspeicherung in Deutschland ist über die vergangenen 20 Jahre zurückgegangen. Basierend auf dem COST-G Kombinationsprodukt von GRACE/GRACE-FO, das die Datensätze von sieben internationalen Prozessierungszentren vereint, beträgt der Rückgang im langjährigen Mittel $-0,76 \text{ Gt/Jahr}$, entsprechend $-0,76 \text{ km}^3/\text{Jahr}$ oder $-2,1 \text{ mm Wasseräquivalent/Jahr}$. Dementsprechend beläuft sich der Verlust des insgesamt in Deutschland gespeicherten Wassers über die letzten 20 hydrologischen Jahre auf $15,2 \text{ km}^3$. Dieser Wert entspricht rund einem Drittel der mittleren jährlichen Jahresamplitude der Gesamtwasserspeicherung Deutschlands. Die Zahlen können weiterhin eingeordnet werden im Hinblick auf ein mittleres jährliches Wasserangebot in Deutschland von 176 km^3 (Jahre 1991 bis 2020)¹¹, oder die in Deutschland alle Sektoren umfassende Wassergewinnung von insgesamt 20 km^3 im Jahr 2019¹². Ein etwa dreifach größerer negativer Trend des in der eingangs zitierten TV-Reportage vom März 2022 verwendeten GRACE/GRACE-FO-Datenproduktes JPL-Mascons über den Beobachtungszeitraum stellt einen oberen Randwert dar, der möglicherweise mit der Prozessierungsmethode dieses Produktes begründet ist, die sich in wesentlichen Punkten von den anderen Produkten unterscheidet. Die unterschiedlichen Ergebnisse für die verschiedenen Datensätze weisen darauf hin, dass mehr als ein GRACE/GRACE-FO-Datensatz analysiert werden sollte, um entsprechende Unsicherheiten bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen zu können. Satellitengravimetrische Messungen erfassen aufgrund des Mess- und Auswertprinzips auch Massenveränderungen außerhalb des eigentlich interessierenden räumlichen Bereichs. Die vorliegende Studie zeigt, dass der Massenverlust der Alpengletscher zu einer Überschätzung des negativen Trends in Deutschland führen kann. Die Abnahme der Wasserspeicherung ist im Süden und Osten Deutschlands am stärksten ausgeprägt.

¹¹ Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz: Abfluss- und Wasserbilanz von Deutschland. Mitteilung an das Umweltbundesamt vom 30. September 2022. Basierend auf KRAHE & NILSON (2012).

¹² Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Fachserie 19, R. 2.1.1 und 2.2

Eine darüber hinausgehende räumliche Differenzierung, wie in der TV-Reportage vom März 2022 suggeriert, ist aus den Satellitendaten alleine nicht möglich. Angesichts einer recht guten Übereinstimmung der von GRACE/GRACE-FO beobachteten mit der mit einem geeigneten Modell simulierten flächengemittelten TWS-Dynamik, wie hier beispielhaft für TerrSysMP gezeigt, können modellbasierte Ergebnisse räumlich höher aufgelöste Informationen bereitstellen, gegebenenfalls unter Nutzung großräumiger satellitenbasierter TWS-Beobachtungen als Randbedingung für Modellkalibrierung oder Datenassimilation.

Eine Extrapolation des von der Satellitengravimetrie beobachteten Speichertrends in Deutschland über den Beobachtungszeitraum von 2002 bis 2022 hinaus sollte nicht vorgenommen werden. Dieser Zeitraum von 20 Jahren ist noch zu kurz, um daraus die langfristige Entwicklung abzuschätzen, da er von mehrjährigen Variationen überprägt ist. Zudem wird er mit dem extrem nassen und von Hochwasserereignissen betroffenen Jahr 2002 zu Beginn und den Dürre Jahren seit 2018 an seinem Ende von Extremen dominiert, die die Trendschätzung stark beeinflussen. Leicht unterschiedliche Analyseperioden resultieren daher in deutlich unterschiedlichen Trendwerten, in diesem Fall deutlich geringeren negativen Trends der Wasserspeicherung. Die Modellergebnisse der simulierten Gesamtspeicherung über eine vollständige Klimareferenzperiode und damit über den GRACE/GRACE-FO-Zeitraum hinaus verdeutlichen diese besondere Einordnung der Beobachtungsperiode 2002 bis 2022.

Die Beobachtungsreihen müssen fortgesetzt werden, um das langfristige Verhalten der Speicherdynamik und des Wasserdargebots in Deutschland und weltweit besser erfassen und in die Zukunft prognostizieren zu können. Die Einbindung der Speicherdaten in Kombination mit vielen anderen Beobachtungen über eine Kalibrierung und Datenassimilation in Modelle ist hierfür eine essentielle Grundlage. Nachfolgemission der Satellitengravimetrie sind bereits in Planung. So soll ab Ende 2027 eine wieder in deutscher-amerikanischer Kooperation (DLR/GFZ/NASA) realisierte Mission GRACE-I (FLECHTNER et al., 2022) für Datenkontinuität sorgen. Die ESA (European Space Agency) plant zusammen mit der NASA (National Aeronautics and Space Administration) eine weitere Mission auf einer nicht-polaren und tieferen Bahn sowie weiterentwickelter Instrumentierung, die im Rahmen einer "Mass change And Geosciences International Constellation" (MAGIC) (DARAS et al., 2022) ab etwa 2031 in Kombination mit GRACE-I dann eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung realisieren soll.

Conclusions

Since 2002, satellite gravimetry with the active GRACE-Follow-On mission and its predecessor GRACE has provided a unique technique for monitoring spatial and temporal variations in continental water storage. Unlike any other technology, gravimetry allows for quantifying storage variations in an integrative way across all storage compartments of the hydrological cycle. Satellite gravimetry directly measures the storage term of the water balance equation $\Delta S = P - ET - Q$ (storage change = precipitation – evapotranspiration – runoff), which is challenging to quantify by other observations or models. In this way, it provides a fundamental contribution to closing the water balance, to a comprehensive understanding of the water budget, and to assessing the water

resources. Methodological limitations of satellite gravimetry in the current mission constellation are the low spatial resolution and, in general, the fuzziness in delineating spatially adjacent storage changes as well as the need for signal separation. The latter means that errors in the separation of non-hydrological signal components covered by satellite gravimetry accumulate in the uncertainty budget of the resulting water storage changes. This refers to mass variations in the atmosphere or long-term geodynamic mass variations such as by postglacial rebound, for instance.

The GRACE/GRACE-FO data show marked seasonal and inter-annual water storage variations in Germany over the last 20 years. Dry and wet periods with notably high and low anomalies of total water storage are obvious. The observed TWS anomalies of particular months and seasons of up to 40 Gt (110 mm) relative to the long-term mean correspond to about the mean seasonal amplitude of TWS or to the standard deviation of annual precipitation in Germany with a mean of 797 mm (1981 to 2010) (SCHÖNWIESE & TRÖMEL, 2011). The general dynamics of these variations are consistent across all GRACE/GRACE-FO-based data products and are also very similar to model results. The inter-annual variations in monthly water storage that emerge after subtracting the mean seasonal cycle are highly correlated with the accumulated precipitation totals of the preceding 12 months. Evaporation contributes only a comparatively small part to explaining these inter-annual storage variations.

Terrestrial water storage in Germany has declined over the past 20 years. Based on the COST-G combination product of GRACE/GRACE-FO, which merges datasets from seven international processing centres, the long-term decline in Germany is -0.76 Gt/year on average, corresponding to -0.76 km³/year or -2.1 mm water equivalent/year. Accordingly, the total loss of water stored in Germany over the last 20 hydrological years amounts to 15.2 km³. This value corresponds to about one-third of Germany's mean seasonal storage amplitude. The value can also be compared to the mean annual water availability of Germany of 176 km³ (years 1991 to 2020)¹¹, or to water reclamation by all sectors in Germany of in total 20 km³ in the year 2019¹². An approximately three-times larger negative trend of the JPL Mascon data product over the observation period as used in the TV media report in March 2022 represents an upper bound value. It may be explained by the processing method of the Mascon product, which differs in several aspects from the other products. The different results of the data sets analyzed here point out that more than one GRACE/GRACE-FO data set should be used to allow for assessing the uncertainties of the results. Due to their measurement and processing principles, satellite gravimetric measurements also capture mass changes outside of the actual area of interest. We show that the loss in mass of Alpine glaciers causes an overestimation of the negative trend in Germany, if not corrected for. The water storage decrease is most pronounced in southern and eastern Germany. A spatial differentiation at smaller scales, as suggested in the TV report in March 2022, is not possible from the satellite data alone. On view of the reasonable correspondence of the area-average TWS dynamics from GRACE/GRACE-FO observations with those from a suitable model as shown here for the example of TerrSysMP, model results may provide information with higher spatial resolution eventually by using satellite-based TWS as a constraint for model calibration or data assimilation.

The storage trend in Germany observed by satellite gravimetry should not be extrapolated beyond the 20-years observation period from 2002 to 2022. This period is still too short for assessing the long-term development since it is impacted by multi-year inter-annual variations. In addition, the extremely wet and flood-prone year 2002 at the beginning and the drought years since 2018 at the end of the period strongly influence the trend estimate. Slightly different analysis periods thus result in markedly different trend values, i.e., markedly lower negative storage trends. The model-based simulated storage dynamics for a full climate reference period beyond GRACE/GRACE-FO illustrate this particular nature of the 2002 to 2022 observation period.

The observation series need to be continued to better capture the long-term behavior of storage dynamics and water supply both in Germany as well as on a global scale, and to support predictions of future fluctuations. Integrating the water storage data with many other observations into models via calibration and data assimilation is an essential basis for this. Follow-up satellite gravimetry missions are already being planned. For example, a GRACE-I mission (FLECHTNER et al., 2022), again realized in German-American cooperation (DLR/GFZ/NASA), is to ensure data continuity from the end of 2027 onwards. Furthermore, ESA is in collaboration with NASA planning another mission on a non-polar and lower orbit and with further advanced instrumentation. From about 2031 onwards, this Mass change And Geosciences International Constellation (MAGIC) mission (DARAS et al., 2022) should then provide a higher spatial and temporal resolution in combination with GRACE-I.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung der Forschungsvorhaben FOR2630/2 (AG, HG, JK) und SFB1502/1–2022-PN450058266 (JK, SK) sowie der Europäischen Union für die Förderung des Projektes G3P (Global Gravity-based Groundwater Product) im Rahmen von Horizon 2020 über Grant n° 870353 (AG, ES, FF, EB, HD).

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die in dieser Studie verwendeten Datensätze der terrestrischen Wasserspeicherung (TWS) von GRACE/GRACE-FO sind über die folgenden Datenportale frei zugänglich: die TWS-Datensätze von COST-G und GFZ über gravis.gfz-potsdam.de und <https://isdg.gfz-potsdam.de>, der TWS-Datensatz ITSG/UB über https://www.apmg.uni-bonn.de/daten-und-modelle/grace_level3_monthly_solutions, sowie der JPL Mascon Datensatz über https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons.

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Andreas Güntner
Universität Potsdam
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
Karl-Liebknecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam
Dr. Eva Boergens
Dr. Henryk Dobslaw
Dr. Ehsan Sharifi
Prof. Dr. Frank Flechtner
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum
Telegrafenberg, 14473 Potsdam
guentner@gfz-potsdam.de
boergens@gfz-potsdam.de

dobslaw@gfz-potsdam.de
sharif@gfz-potsdam.de
flechtner@gfz-potsdam.de

Helena Gerdener
Prof. Dr. Jürgen Kusche
Universität Bonn
Institut für Geodäsie und Geoinformation
Nußallee 17, 53115 Bonn
gerdener@geod.uni-bonn.de
kusche@geod.uni-bonn.de

Prof. Stefan Kollet
Carl Hartick
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich
s.kollet@fz-juelich.de
c.hartick@fz-juelich.de

Literaturverzeichnis

- A, G., J. WAHR & S. ZHONG (2013): Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada, *Geophysical Journal International*, 192, 557–572, 201.
- ABICH, K., A. ABRAMOVICI, B. AMPARAN, A. BAATZSCH, B.B. OKIHIRO, D.C. BARR, M.P. BIZE, C. BOGAN, C. BRAXMAIER, M.J. BURKE, K.C. CLARK, C. DAHL, K. DAHL, K. DANZMANN, M.A. DAVIS, G. DE VINE, J.A. DICKSON, S. DUBOVITSKY, A. ECKARDT, T. ESTER, G.F. BARRANCO, R. FLATSCHER, F. FLECHTNER, W.M. FOLKNER, S. FRANCIS, M.S. GILBERT, F. GILLES, M. GOHLKE, N. GROSSARD, B. GUENTHER, P. HAGER, J. HAUDEN, F. HEINE, G. HEINZEL, M. HERDING, M. HINZ, J. HOWELL, M. KATSUMURA, M. KAUFER, W. KLIPSTEIN, A. KOCH, M. KRUGER, K. LARSEN, A. LEBEDA, A. LEBEDA, T. LEIKERT, C.C. LIEBE, J. LIU, L. LOBMEYER, C. MAHRDT, T. MANGOLDT, K. MCKENZIE, M. MISFELDT, P.R. MORTON, V. MÜLLER, A.T. MURRAY, D.J. NGUYEN, K. NICKLAUS, R. PIERCE, J.A. RAVICH, G. REAVIS, J. REICHE, J. SANJUAN, D. SCHÜTZE, C. SEITER, D. SHADDOCK, B. SHEARD, M. SILEO, R. SPERO, G. SPIERS, G. STEDE, M. STEPHENS, A. SUTTON, J. TRINH, K. VOSS, D. WANG, R.T. WANG, B. WARE, H. WEGENER, S. WINDISCH, C. WOODRUFF, B. ZENDER & M. ZIMMERMANN (2019): In-Orbit Performance of the GRACE Follow-on Laser Ranging Interferometer. – *Physical Review Letters*, 123, 031101.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.031101.
- BALDAUF, M., A. SEIFERT, J. FOERSTNER, D. MAJEWSKI, M. RASCHENDORFER & T. REINHARDT (2011): Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Monthly Weather Review*, 139(12), 3887–3905.
DOI: 10.1175/MWR-D-10-05013.1.
- BLAUHUT, V., M. STOELZLE, L. AHOPELTO, M.I. BRUNNER, C. TEUTSCHBEIN, D.E. WENDT, V. AKSTINAS, S.J. BAKKE, L.J. BARKER, L. BARTOSOVA, A. BRIEDE, C. CAMMALLERI, K.C. KALIN, L. DE STEFANO, M. FENDEKOVA, D.C. FINGER, M. HUYSMANS, M. IVANOV, J. JAAGUS, J. JAKUBINSKY, S. KRAKOVSKA, G. LAAHA, M. LAKATOS, K. MANEVSKI, M.N. ANDERSEN, N. NIKOLOVA, M. OSUCH, P. VAN OEL, K. RADEVA, R.J. ROMANOWICZ, E. TOTH, M. TRNKA, M. UROSEV, J.U. REGUERA, E. SAUQUET, A. STEVKOV, L.M. TALLAKSEN, I. TROFIMOVA, A.F. VAN LOON, M.T.H. VAN VLIET, J.P. VIDAL, N. WANDERS, M. WERNER, P. WILLEMS & N. ZIVKOVIC (2022): Lessons from the 2018-2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(6), 2201-2217.
DOI: 10.5194/nhess-22-2201-2022.
- BOEING, F., O. RAKOVEC, R. KUMAR, L. SAMANIEGO, M. SCHRON, A. HILDEBRANDT, C. REBMANN, S. THOBER, S. MULLER, S. ZACHARIAS, H. BOGENA, K. SCHNEIDER, R. KIESE, S. ATTINGER & A. MARX (2022): High-resolution drought simulations and comparison to soil moisture observations in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences* 26(19), 5137-5161. DOI: 10.5194/hess-26-5137-2022.

- BOERGENS, E., A. KVAS, A. EICKER, H. DOBSLAW, L. SCHAWOHL, C. DAHLE, M. MURBÖCK & F. FLECHTNER (2022): Uncertainties of GRACE-Based Terrestrial Water Storage Anomalies for Arbitrary Averaging Regions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. DOI: 10.1029/2021JB022081.
- BOERGENS, E., A. GÜNTNER, H. DOBSLAW & C. DAHLE (2020a): Quantifying the Central European Droughts in 2018 and 2019 with GRACE-Follow-On. *Geophysical Research Letters*, 47, 14. DOI: 10.1029/2020GL087285.
- BOERGENS, E., C. DAHLE, H. DOBSLAW, I. SASGEN, S. REISSLAND & F. FLECHTNER (2020b): Globale Massenverteilungen aus Satellitengravimetrie: Das interaktive Datenportal GravIS. - *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 145, 5. <http://gravis.gfz-potsdam.de>.
- CAMMALLERI, C., C. ARIAS-MUÑOZ, P. BARBOSA, A. DE JAGER, D. MAGNI, D. MASANTE, M. MAZZESCHI, N. MCCORMICK, G. NAUMANN, J. SPINONI & J. VOGT (2021): A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 481–495. DOI: 10.5194/nhess-21-481-2021.
- CAZENAIVE A., B. MEYSSIGNAC, M. ABLAIN, M. BALMASEDA, J. BAMBER et al. (2018): Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data* 10:1551–1590. DOI: 10.5194/essd-10-1551-2018.
- CHEN, J.L., B. TAPLEY, M.E. TAMISIEA, H. SAVE, C. WILSON, S. BETTADPUR & K.W. SEO (2021): Error Assessment of GRACE and GRACE Follow-On Mass Change. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 126(9). DOI: 10.1029/2021jb022124.
- DAHLE, C., M. MURBÖCK, F. FLECHTNER, H. DOBSLAW, G. MICHALAK, K. NEUMAYER, O. ABRYKOSOV, A. REINHOLD, R. KÖNIG, R. SULZBACH & C. FÖRSTE (2019): The GFZ GRACE RL06 Monthly Gravity Field Time Series: Processing Details and Quality Assessment. *Remote Sensing*, 11, 18, 2116. DOI: 10.3390/rs11182116.
- DARAS, I., L. TSAOUSSI, G. MARCH, P. SILVESTRIN, B. DOMINGUEZ, C. DUNN, L. MASSOTTI & C. WEBB (2022): Mass change And Geosciences International Constellation (MAGIC) – Status of the ESA/NASA mission concept. Abstract at ESA Living Planet Symposium 2022, Bonn, https://express.converia.de/frontend/index.php?page_id=18446&v=List&do=15&day=3995&ses=20694#.
- DAS ERSTE (2022): Bis zum letzten Tropfen – Die Doku. ARD Dokumentation vom 16.03.2022, <https://www.daserste.de/unterhaltung/film/unser-wasser/doku/bis-zum-letzten-tropfen-die-doku-100.html>. ARD-Mediathek, verfügbar bis 16.03.2023.
- DOBSLAW, H. & E. BOERGENS (2020): GFZ/COST-G GravIS Level-3 Products: Terrestrial Water Storage Anomalies (Technical Note).
- EICKER, A., M. SCHUMACHER, J. KUSCHE, P. DÖLL & H. MÜLLER SCHMIED (2014): Calibration/Data Assimilation Ap-proach for Integrating GRACE Data into the WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM) Using an Ensemble Kalman Filter: First Results. *Surveys in Geophysics*, 35(6), 1285–1309.
- FLECHTNER, F., K.-H. NEUMAYER, C. DAHLE, H. DOBSLAW, E. FAGIOLINI, J.-C. RAIMONDO & A. GÜNTNER (2016): What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? - *Surveys in Geophysics*, 37, 2, 453–470. DOI: 10.1007/s10712-015-9338-y
- FLECHTNER, F., C. DAHLE, M. HAUKE, S. WILMS, M. MURBÖCK, M. NYENHUIS & P. SCHAADT (2022): GRACE-I: A joint US-German mission for continued mass transport monitoring and enabling global biodiversity monitoring. Abstract at ESA Living Planet Symposium 2022, Bonn. https://express.converia.de/frontend/index.php?page_id=18446&v=List&do=15&day=3995&ses=20695#.
- FURUSHO-PERCOT, C., K. GOERGEN, G. HARTICK, K. KULKARNI, J. KEUNE & S. KOLLET (2019): Pan-European groundwater to atmosphere terrestrial systems climatology from a physically consistent simulation. *Scientific Data*, 6(1), 320. DOI: 10.1038/s41597-019-0328-7.
- GASPER, F., K. GOERGEN, P. SHRESTHA, M. SULIS, J. RIHANI, M. GEIMER & S. KOLLET (2014): Implementation and scaling of the fully coupled Terrestrial Systems Modeling Platform (TerrSysMP v1.0) in a massively parallel supercomputing environment – a case study on JUQUEEN (IBM Blue Gene/Q). *Geoscientific Model Development*, 7(5), 2531–2543. DOI: 10.5194/gmd-7-2531-2014.
- GERDENER, H., O. ENGELS & J. KUSCHE (2020): A framework for deriving drought indicators from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 227–248. DOI: 10.5194/hess-24-227-2020.
- GERDENER, H., J. KUSCHE, K. SCHULZE, G. GHAZARYAN & O. DUBOVYK (2022): Revising precipitation – water storages – vegetation signatures with GRACE-based data assimilation, *Journal of Hydrology*, 612. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128096.
- HARRIS, I.C., P.D. JONES & T. OSBORN (2021): CRU TS4.05: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.05 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901–Dec. 2020). NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis.
- HELLWIG, J., I.E.M. DE GRAAF, M. WEILER & K. STAHL (2020): Large-Scale Assessment of Delayed Groundwater Responses to Drought, *Water Resources research*, 56(2). DOI: 10.1029/2019wr025441.
- HERSBACH, H., B. BELL, P. BERRISFORD, S. HIRAHARA, A. HORÁNYI, J. MUÑOZ-SABATER et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- HORVATH, A., M. MURBÖCK, R. PAIL & M. HORWATH (2018): Decorrelation of GRACE time variable gravity field solutions using full covariance information. *Geosciences* 8, 323. DOI: 10.3390/geosciences8090323.
- JÄGGI, A., U. MEYER, M. LASSER, B. JENNY, T. LOPEZ, F. FLECHTNER, C. DAHLE, C. FÖRSTE, T. MAYER-GÜRR, A. KVAS, J.-M. LEMOINE, S. BOURGOGNE, M. WEIGELT & A. GROH (2020): International Combination Service for Time-Variation Gravity Fields (COST-G) - Start of Operational Phase and Future Perspectives. In: *International Association of Geodesy Symposia Series*, edited by Freymueller, J., Springer, Berlin, Heidelberg.
- KOLLET, S.J. & R.M. MAXWELL (2006): Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advances in Water Resources*, 29(7), 945–958. DOI: 10.1016/j.advwatres.2005.08.006.
- KRAHE, P. & E. NILSON (2021): Deutschlands Wasserbilanz. *Umweltmagazin*, 0-708-2021, 32-35.
- KUSCHE, J. (2007): Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models. *Journal of Geodesy* 81, 733–749. DOI: 10.1007/s00190-007-0143-3.
- KUSCHE, J., R. SCHMIDT, S. PETROVIC & R. RIETBROEK (2009): Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model. *Journal of Geodesy* 83, 903–913. DOI: 10.1007/s00190-009-0308-3.
- KUSCHE, J., A. EICKER, E. FOROOTAN, A. SPRINGER & L. LONGUEVERGNE (2016): Mapping probabilities of extreme continental water storage changes from space gravimetry. *Geophysical Research Letters*, 43, 8026–8034 (2016).
- KVAS, A., S. BEHZADPOUR, M. ELLMER, B. KLINGER, S. STRASSER, N. ZEHNTNER & T. MAYER-GÜRR (2019): ITSG-Grace2018: Overview and evaluation of a new GRACE-only gravity field time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. DOI: 10.1029/2019JB017415.
- LANDERER, F.W., F. FLECHTNER, H. SAVE, F.H. WEBB, T. BANDIKOVA, W.I. BERTIGER, S.V. BETTADPUR, S. BYUN, C. DAHLE, H. DOBSLAW, E. FAHNESTOCK, N. HARVEY, Z. KANG, G.L.H. KRUIZINGA, B.D. LOOMIS, C. MCCULLOUGH, M. MURBÖCK, P. NAGEL, M. PAIK, N. PIE, S. POOLE, D. STREKALOV, M.E. TAMISIEA, F. WANG, M.M. WATKINS, H. WEN, D.N. WIESE & D. YUAN (2020): Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. – *Geophysical Research Letters*, 47, 12, e2020GL088306. DOI: 10.1029/2020GL088306.

- LANDERER, F.W. & S.C. SWENSON (2012): Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources Research*, 48, W04531. DOI: 10.1029/2011WR011453.
- LÖCHER, A. & J. KUSCHE (2021): A hybrid approach for recovering high-resolution temporal gravity fields from satellite laser ranging. *Journal of Geodesy* 95(1). DOI: 10.1007/s00190-020-01460-x.
- MAXWELL, R.M. (2013): A terrain-following grid transform and preconditioner for parallel, large-scale, integrated hydrologic modeling. *Advances in Water Resources*, 53, 109–117. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.10.001.
- MAYER-GÜRR, T., S. BEHZADPUR, M. ELLMER, A. KVAS, B. KLINGER, S. STRASSER & N. ZEHENTNER (2018): ITSG-Grace2018 – Monthly, Daily and Static Gravity Field Solutions from GRACE. GFZ Data Services. DOI: 10.5880/ICGEM.2018.003.
- MEYER, U., Y. JEAN, A. KVAS, C.H. DAHLE, J.M. LEMOINE & A. JÄGGI (2019): Combination of GRACE monthly gravity fields on the normal equation level. *Journal of Geodesy*, 93, 1645–1658. DOI: 10.1007/s00190-019-01274-6.
- MCKEE, T.B., N.J. DOESKEN & J. KLEIST (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184.
- OLESON, K.W., Y. DAI, G.B. BONAN, M. BOSILOVICH, R.E. DICKINSON, P.A. DIRMEYER et al. (2004). Technical Description of the Community Land Model (CLM). NCAR Technical Note, NCAR/TN-46, 186. DOI: 10.5065/D6N877R0.
- OLESON, K.W., G.Y. NIU, Z.L. YANG, D.M. LAWRENCE, P.E. THORNTON, P.J. LAWRENCE et al. (2008): Improvements to the community land model and their impact on the hydrological cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(1). DOI: 10.1029/2007JG000563.
- PELTIER, W.R., D.F. ARGUS & R. DRUMMOND (2018): Comment on "An Assessment of the ICE-6G_C (VM5a) Glacial Isostatic Adjustment Model" by Purcell et al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 2019–2018. DOI: 10.1002/2016JB013844.
- RAKOVEC, O., L. SAMANIEGO, V. HARI, Y. MARKONIS, V. MORAVEC, S. THOBER, M. HANEL & R. KUMAR (2022): The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe, *Earths Future*, 10(3). DOI: 10.1029/2021ef002394.
- RIETBROEK, R., S.-E. BRUNNABEND, J. KUSCHE, J. SCHRÖTER & C. DAHLE (2016): Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(6):1504–1509.
- RINKE, K., S.C. MIETZ & M. SCHNEPPMULLER (2021): The effects of the record-setting drought from 2018 to 2020 on ground water tables in Central Germany. *Wasserwirtschaft* 111(11), 49–56. DOI: 10.1007/s35147-021-0908-2.
- SCHNEIDER, U., A. BECKER, P. FINGER, E. RUSTEMEIER & M. ZIESE (2020): GPCP Full Data Monthly Product Version 2020 at 1.0°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historical Data. DOI: 10.5676/DWD_GPCP/FD_M_V2020_100.
- SCHÖNWIESE, C.D. & S. TRÖMEL (2011): Langzeitänderungen des Niederschlags in Deutschland. In: Lozán, J. L., Graßl, H., Hupfer, P., Karbe, L., Schönwiese, C. D. (Hrsg.): *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?* 3. Auflage, 302–210.
- SHAMSUDDUHA, M. & R.G. TAYLOR (2020): Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth System Dynamics* 11(3): 755–774.
- SHRESTHA, P., M. SULIS, M. MASBOU, S. KOLLET & C. SIMMER (2014): A Scale-Consistent Terrestrial Systems Modeling Platform Based on COSMO, CLM, and ParFlow. *Monthly Weather Review*, 142(9), 3466–3483. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00029.1
- TAPLEY, B.D., M.M. WATKINS, F. FLECHTNER, C. REIGBER, S. BETTADPUR, M. ROPELL, I. SASGEN, J.S. FAMIGLIETTI, F.W. LANDERER, D.P. CHAMBERS, J.T. REAGER, A.S. GARDNER, H. SAVE, E.R. IVINS, S.C. SWENSON, C. BOENING, C. DAHLE, D.N. WIESE, H. DOBSLAW, M.E. TAMISIEA & I. VELICOGNA (2019): Contributions of GRACE to understanding climate change. - *Nature Climate Change*, 9, 358–369, DOI: 10.1038/s41558-019-0456-2.
- THONFELD, F., U. GESSNER, S. HOLZWARTH, J. KRIESE, E. DA PONTE, J. HUTH & C. KUENZER (2022): A First Assessment of Canopy Cover Loss in Germany's Forests after the 2018–2020 Drought Years. *Remote Sensing* 14(3). DOI: 10.3390/rs14030562.
- TIJDEMAN, E. & L. MENZEL (2021): The development and persistence of soil moisture stress during drought across southwestern Germany. *Hydrology and Earth System Science* 25, 2009–2025. DOI: 10.5194/hess-25-2009-2021.
- VICENTE-SERRANO, S.M., S. BEGUERIA & J.I. LOPEZ-MORENO (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23 (7): 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- VISHWAKARMA, B.D., B. DEVARAJU & N. SNEEUW (2018): What Is the Spatial Resolution of grace Satellite Products for Hydrology? *Remote Sensing*, 10(6). DOI: 10.3390/rs10060852.
- WAHR, J., M. MOLENAAR & F. BRYAN (1998): Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *Journal of Geophysical Research*, 103(12), 30205–30229.
- WAHR J., S. SWENSON & I. VELICOGNA (2006): Accuracy of GRACE mass estimates, *Geophysical Research Letters*, 33, L06401. DOI: 10.1029/2005GL025305.
- WATKINS, M.M., D.N. WIESE, D.N. YUAN, C. BOENING & F. W. LANDERER (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* 120(4): 2648–2671.
- WGMS (2021): *Fluctuations of Glaciers Database*. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.
- WMO (2022): The 2022 GCOS Implementation Plan (GCOS-244). World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22134#Y6RslRWZMdg.
- WIELAND, M. & S. MARTINIS (2020): Large-scale surface water change observed by Sentinel-2 during the 2018 drought in Germany. *International Journal of Remote Sensing* 41(12), 4740–4754. DOI: 10.1080/01431161.2020.1723817.
- WIESE, D.N., F.W. LANDERER & M.M. WATKINS (2016): Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution, *Water Resources Research*, 52(9), 7490–7502. DOI: 10.1002/2016wr019344.
- WOUTERS, B., A. GARDENER & G. MOHOLDT (2019): Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002–2016). *Frontiers in Earth Sciences*, 7, 96. DOI: 10.3389/feart.2019.00096.
- ZEMP, M., M. HUSS, E. THIBERT, N. ECKERT, R. MCNABB, J. HUBER et al. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* 568, 382. DOI: 10.1038/s41586-019-1071-0.
- ZIESE, M., A. BECKER, P. FINGER, A. MEYER-CHRISTOFFER, B. RUDOLF & U. SCHNEIDER (2011): GPCP First Guess Product at 1.0°: Near Real-Time First Guess monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges based on SYNOP Data. DOI: 10.5676/DWD_GPCP/FG_M_100.
- ZINK, M., L. SAMANIEGO, R. KUMAR, S. THOBER, J. MAI, D. SCHAFFER & A. MARX (2016): The German drought monitor, *Environmental Research Letters*, 11(7). DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074002.