



KLIMA

Die Wasserspeicher Mitteleuropas – beobachtet aus dem Weltall

DAS DEUTSCHE GEODÄTISCHE FORSCHUNGSINSTITUT BERECHNET MIT MODERNSTER SATELLITENTECHNOLOGIE MODELLE, DIE DIE VERÄNDERUNGEN DES GLOBALEN WASSERKREISLAUFS UND DEREN AUSWIRKUNGEN AUF DAS KLIMA ZEIGEN.

VON MICHAEL SCHMIDT
UND FLORIAN SEITZ

Der jüngste Bericht des Internationalen Wissenschaftsrats zum Klimawandel (IPCC) aus dem Jahre 2007 bewertet die kontinentale Hydrologie als die Komponente des globalen Wasserkreislaufs, die am ungenauesten bestimmt ist. Die derzeit existierenden Hydrologiemodelle erfüllen noch lange nicht die Anforderungen, die für genaue, zuverlässige Aussagen über klimatische Veränderungen notwendig wären. Dies verdeutlicht, wie wichtig es ist, die Hydrologie mit all ihren Speicher- und Wechselbeziehungen zu erforschen. Die Geodäsie als messende Wissenschaft ist mit ihren modernen Beobachtungsverfahren in der Lage, die Oberflächengestalt, das Gravitationsfeld und die räumliche Orientierung der Erde mit hoher Genauigkeit und Kontinuität darzustellen. Sie kann daher auch Aufschluss über die Hydrologie geben, denn hydrologische Massenvariationen beeinflussen die Oberflächengestalt, das Gravitationsfeld und die Orientierung der Erde.

Abb. 1: Die wichtigsten Komponenten des Systems Erde sind die Geosphäre (feste Erde), die Hydrosphäre (Ozeane und kontinentale Hydrologie), die Atmosphäre, die Biosphäre (Vegetation) und die Cryosphäre (Eis, Gletscher). Geodätische Beobachtungssysteme registrieren Signale der Erdsystemkomponenten.

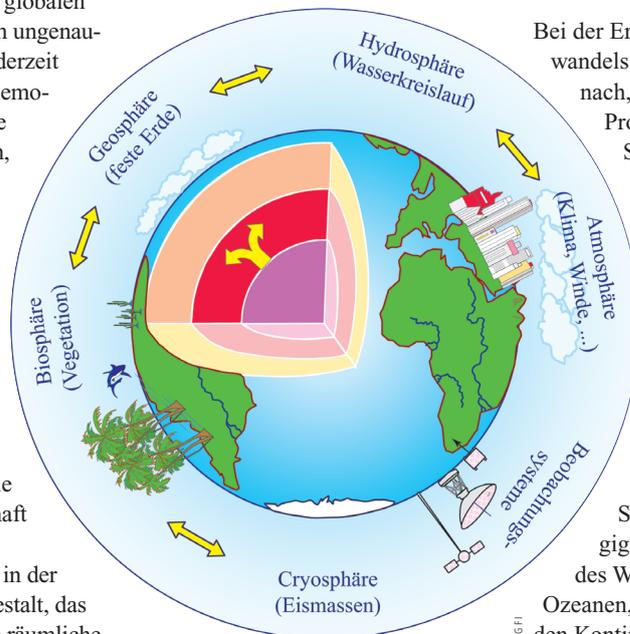
System Erde

Unter diesem Begriff versteht man den physikalisch definierten Bereich, der die festen, flüssigen und gasförmigen Elemente innerhalb des Erdkörpers, auf der Erdoberfläche und im erdnahen Außenraum

Erde werden durch eine Vielzahl von Prozessen verursacht, z. B. durch Ozeanzirkulationen, Wasseraustausch zwischen verschiedenen Wasserspeichern, Gewässerabfluss oder Meeresspiegelvariationen.

Globaler Wasserkreislauf

Bei der Erforschung des Klimawandels geht man der Frage nach, welche grundlegenden Prozesse innerhalb des Systems Erde das Klima beeinflussen. Hierbei ist es wichtig, globale Kreisläufe ebenso wie die Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten zu verstehen. Der globale Wasserkreislauf ist ein geschlossenes System und bedeutet die von der Sonnenenergie abhängige ständige Zirkulation des Wassers zwischen den Ozeanen, der Atmosphäre und den Kontinenten infolge Verdunstung, Niederschlag und Abfluss. Bezeichnet man für ein bestimmtes Gebiet, etwa das Einzugsgebiet der Donau, den von der Zeit t abhängigen Gesamtniederschlag mit $P(t)$, die Verdunstung mit $E(t)$ und den Gesamtabfluss mit $R(t)$, so liefert die Wasserbilanzgleichung $\Delta S(t) =$



umfasst. Abbildung 1 zeigt die wichtigsten Systemkomponenten; sie sind ständigen Veränderungen unterworfen und durch Wechselbeziehungen miteinander verknüpft. Massentransporte und Massenverteilungen innerhalb des Systems



$P(t) - E(t) - R(t)$ die Wasserspeicheränderung $\Delta S(t)$ innerhalb des Gebiets.

Kontinentale Hydrologie

Die kontinentale Hydrologie beinhaltet die Wasserspeicherkomponenten Oberflächenwasser (Seen, Flüsse, Reservoirs und Feuchtgebiete), Schnee, Eis, Bodenfeuchte und Grundwasser. Dabei sind nur 3 % des Gesamtwassers der Erde Süßwasser. Ungefähr 68 % des Süßwassers sind als Schnee und Eis auf der Antarktis und in Grönland gespeichert, weitere 30 % bilden das Grundwasser. Nur 0,3 % des Süßwassers sind Oberflächenwasser.

Geodätische Satellitenmessverfahren

In der Vergangenheit war es äußerst schwierig oder häufig sogar unmöglich, Massenverlagerungen und Massenbewegungen innerhalb des Systems Erde zu beobachten. Heutzutage machen es moderne Satellitenmissionen möglich, Massenverteilungen festzustellen, wobei aber immer nur der integrale Effekt, d. h. die Gesamtmassenverteilung, registriert werden kann. Hydrologische Variationen lassen sich also nur beobachten, wenn die Effekte der übrigen Komponenten des Systems Erde bekannt sind und berücksichtigt, d. h. von den Messwerten reduziert werden. Üblicherweise werden diese Effekte aus geophysikalischen Modellen, z. B. für die Ozeane und die Atmosphäre, berechnet. Es ist demnach unbedingt zu beachten, dass die resultierenden residualen Messreihen nicht nur die hydrologischen Variationen enthalten, sondern auch die Fehler dieser geophysikalischen Reduktionsmodelle, die auch als Hintergrundmodelle bezeichnet werden.

Das Hauptziel der deutsch-amerikanischen Satelliten-Gravitations-

feldmission GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) ist die hochgenaue Erfassung des statischen und zeit-variablen Gravitationsfeldes der Erde. Aus Letzterem lassen sich die Zirkulationen ozeanischer Wassermassen und des globalen Wasserkreislaufs erkennen und deren Auswirkungen auf Klima und Umwelt entschlüsseln.

Die GRACE-Mission besteht aus zwei identischen Satelliten, die im März 2002 gestartet wurden und in einer Höhe von ungefähr 500 Kilometern und mit einem Abstand von 220 Kilometern entlang derselben Satellitenbahn fliegen. Da die Neigung der Satellitenbahn 89° beträgt, liegt eine nahezu globale Überdeckung vor. Das Satellitenpaar reagiert empfindlich auf kleinste Gravitationsfeldänderungen, die aus der räumlichen Verteilung der unterschiedlichen Massen resultieren. Diese Änderungen werden über extrem genaue Distanzmessungen zwischen den beiden Satelliten erkannt; die Genauigkeit einer Abstandsmessung beträgt nur wenige Mikrometer. Zudem haben beide GRACE-Satelliten GPS-Empfänger an Bord, mit deren Hilfe die Satellitenbahn bestimmt wird; Akzelerometer erlauben es ferner, die Messungen um nicht-gravitativ Einflüsse wie z. B. den Atmosphärenwiderstand zu korrigieren.

GRACE Gravitationsfeldmodelle

Am Helmholtz Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), am Center for Space Research (CSR) in Austin, Texas, und am Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, Kalifornien, werden aus den GRACE-Daten Gravitationsfeldmodelle der Erde berechnet. Man unterscheidet generell zwischen statischen und zeit-variablen Gravitationsfeldern. Für hydrologische Untersuchungen sind Letztere von Interesse. Mathe-

matisch handelt es sich dabei um Kugelfunktionsentwicklungen, die üblicherweise für jeweils einen Monat berechnet werden. GRACE liefert mittlerweile eine fast sechsjährige Zeitreihe globaler Gravitationsfelder, aus denen Massenverlagerungen und Massenbewegungen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Monat und mit einer räumlichen Auflösung von ungefähr 500 Kilometern festgestellt werden können. Es lassen sich demnach großräumige saisonale und mehrjährige Effekte erkennen.

Bei der Untersuchung hydrologischer Effekte in Flussbeckensystemen handelt es sich aber nicht um eine globale, sondern um eine regionale Problemstellung. Während Kugelfunktionen mathematisch ein globales Funktionensystem bilden, können beispielsweise sphärische Splines oder Wavelets zur regionalen Darstellung genutzt werden. Am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) in München wird das Gravitationsfeld in sphärischen Wavelets entwickelt. Abbildung 2 zeigt als Beispiel für ein Wavelet eine sphärische Blackman-Funktion, die hervorragend zur regionalen Modellierung geeignet ist.

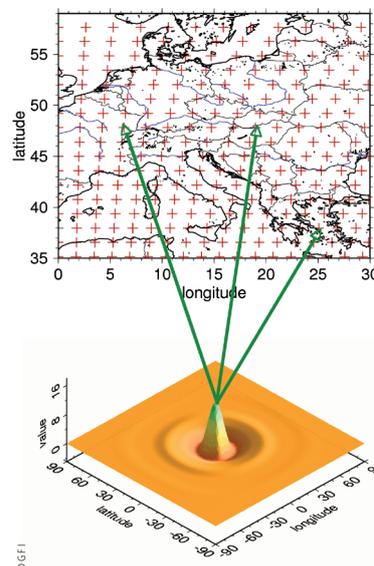


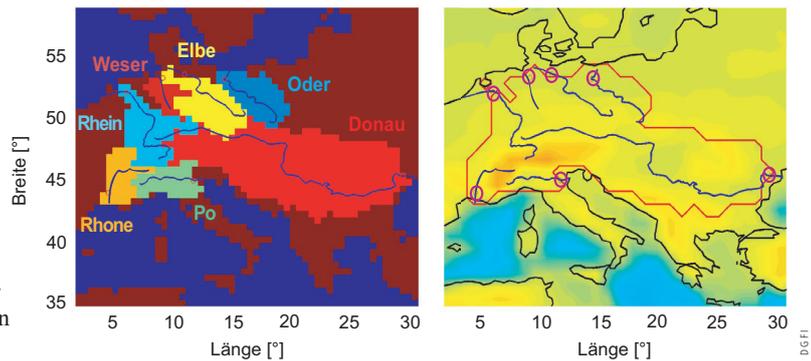
Abb. 2: Sphärische Blackman-Funktion (unten), die wie ein „Hütchen“ rotations-symmetrisch wirkt und näherungsweise nur in einem kleinen Gebiet auf der Kugeloberfläche ungleich Null ist. Dies ist der Grund, warum solche lokalisierenden Funktionen hervorragend zur regionalen Modellierung geeignet sind. Als Berechnungspunktgitter wurde das Reuter-Gitter gewählt (oben). Jedem Gitterpunkt wird eine Blackman-Funktion zugeordnet; die grünen Pfeile symbolisieren diesen Vorgang.

Abb. 3: Das Untersuchungsgebiet in Mitteleuropa, bestehend aus sieben Flussbecken (links); der Rand des Untersuchungsgebietes ist rot markiert (rechts), die purpurfarbenen Kreise weisen auf die Orte der gewählten Pegelstationen nahe der Flussmündungen.

Untersuchungsgebiet

In den letzten Jahren wurden in Mitteleuropa extreme Wetterverhältnisse beobachtet: Hitzewellen und Dürreperioden wechselten sich mit übermäßigen Regenfällen und damit verbundenen katastrophalen Hochwassern ab. Extrem schneereichen, langen Wintern folgten milde, nahezu schneefreie Winter. Solche großräumigen Wetterphänomene spiegeln sich als Massenvariationen in den Wasserspeichern wider und lassen sich daher mit Hilfe der GRACE-Mission beobachten. Abbildung 3 zeigt links das Untersuchungsgebiet in Mitteleuropa, das aus den sieben größten Flussbecken Rhone, Rhein, Weser, Elbe, Oder, Donau und Po besteht.

Die folgenden Untersuchungen lassen sich an der oben beschriebenen Wasserbilanzgleichung erläutern. Während mittels der GRACE-Messungen die Wasserspeicheränderung $\Delta S(t)$ innerhalb des Untersuchungsgebiets gemessen bzw. gerechnet werden kann, wird die Differenz $P(t) - E(t)$ zwischen Gesamtniederschlag und Verdunstung innerhalb des Untersuchungsgebiets aus einem Modell der Atmosphäre berechnet. Den Abfluss $R(t)$ kann man an den



Flusspegelstationen messen. Auf diese Weise lässt sich also feststellen, inwieweit die verwendeten Messungen und Modelle die obige Gleichung erfüllen.

Wasserspeichervariationen aus GRACE

Das Gravitationsfeld der Erde wird – wie schon erwähnt – mathematisch als Reihe in den Blackman-Funktionen (siehe Abb. 2) beschrieben. Dazu wählt man zunächst ein geeignetes Punktgitter für das Untersuchungsgebiet aus; jedem Gitterpunkt wird dann eine Blackman-Funktion zugewiesen. Aufwändige Auswerteprozeduren berechnen im nächsten Schritt aus den GRACE-Messungen diejenigen Koeffizienten, die das Gravitationsfeld innerhalb des Untersuchungsgebiets mit einer hohen Genauigkeit approximieren. Die vorprozessierten GRACE-Eingangsdaten wurden uns freundlicherweise von der Ohio State University in Columbus, USA zur Verfügung gestellt. Mittels

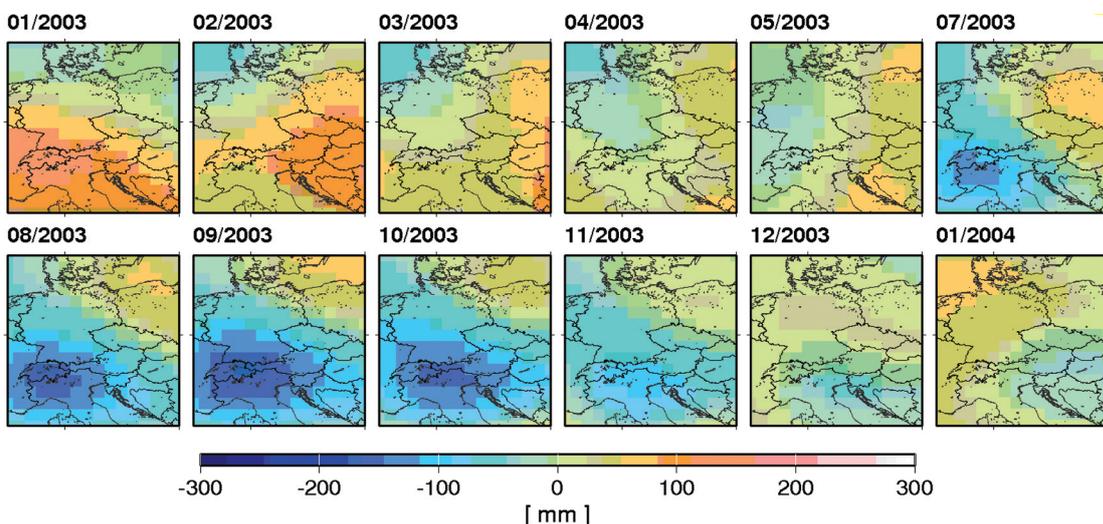
physikalischer Parameter wird das berechnete Gravitationsfeld in Oberflächendichten transformiert. Dividiert man weiter die Oberflächendichte durch die Dichte des Wassers, so erhält man die äquivalente Wasserhöhe (*equivalent water height*, EWH), in der Gravitationsfeldänderungen infolge hydrologischer Massenvariationen üblicherweise angegeben werden. Dabei entspricht 1 m EWH einem Druck von ungefähr 100 mbar. Abbildung 4 zeigt „Schnappschüsse“ der EWH in Mitteleuropa, gültig für den jeweils 1. Tag eines Monats im Jahr 2003. Deutlich erkennt man sehr niedrige EWH-Werte für die Monate Juli bis November. In dieser Zeit wiesen die Wasserstände der großen mitteleuropäischen Flüsse Rekordtiefstände auf.

Abb. 4: Äquivalente Wasserhöhen (EWH) für Mitteleuropa in zeitlichen Abständen von einem Monat.

Die räumliche Integration der EWH über das Untersuchungsgebiet für jeden Zeitpunkt t liefert die Wasserspeicheränderung $\Delta S(t)$ für das Untersuchungsgebiet (grüne Kurve in Abb. 5). Die Kurve weist für einen Zeitraum von etwa vier Monaten in der zweiten Hälfte des Jahres 2004 eine Lücke auf, da während dieser Zeit infolge der ungünstigen Verteilung der Satellitenbahnen nur ungenaue GRACE-Lösungen berechnet werden konnten.

Wasserspeichervariationen aus Modellen und Pegeldaten

Die Berechnung der Differenz $P(t) - E(t)$ auf der rechten Seite der Gleichung wurde mittels eines Atmosphärenmodells des National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/



NCAR) berechnet. Die Integration der Modellwerte über das Untersuchungsgebiet liefert den Gesamtzufluss, d. h. die Wassermenge, die zu einem Zeitpunkt t in das Gebiet eintritt. Der Gesamtabfluss wird aus den von den Pegelstationen (siehe Abb. 3) registrierten Abflussdaten $R(t)$ berechnet. Diese Datensätze stellte uns freundlicherweise das Global Runoff Data Centre (GRDC) in Koblenz zur Verfügung. Berechnet man für jeden Zeitpunkt die Differenz zwischen Gesamtzufluss und -abfluss, erhält man die blaue Kurve in Abbildung 5. Aus dem Vergleich der grünen mit der blauen Kurve, d. h. der linken und der rechten Seite der Ausgangsgleichung, erkennt man eine recht gute Übereinstimmung. Die Gründe für die Abweichungen können vielfältig sein: Zum einen werden auf beiden Seiten fehlerbehaftete Messungen (GRACE-Daten und Pegeldata) und unvollständige Modelle verwendet; zum anderen werden auch in der jeweiligen Auswertesoftware Vereinfachungen vorgenommen. Jedenfalls lässt sich feststellen, dass die Werte der grünen Kurve mit einer Genauigkeit von 15 bis 30 km^3 berechnet wurden.

Zum Vergleich wurden auch noch die EWH aus dem zuvor erwähnten globalen Kugelfunktionsmodell des GFZ für das Gravitationsfeld berechnet und über das Untersuchungsgebiet integriert (rote Kurve in Abb. 5 und Abb. 6). Hierbei wurde die neueste Version RL04 gewählt und um Störeinflüsse korrigiert. Wieder stellt man eine gute Übereinstimmung mit den beiden übrigen Kurven fest. In einigen Zeitintervallen passt die grüne Kurve, d. h. die regionale Lösung des DGFI, besser zu der blauen Kurve als die GFZ-Lösung. Dies ist umso bemerkenswerter, weil bei der GRACE-Vorprozessierung an der Ohio State University im Jahr 2006 noch deutlich schlech-

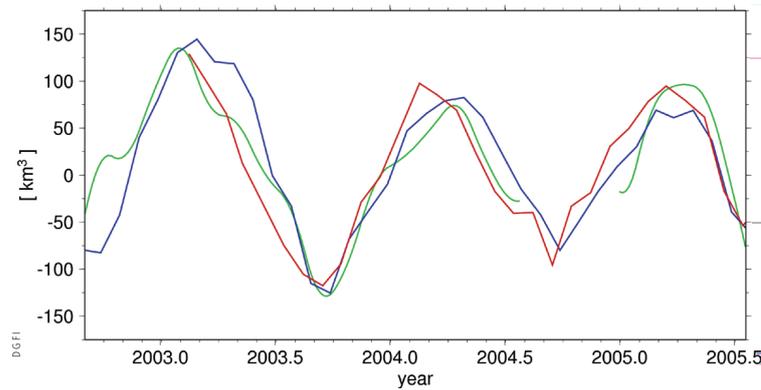


Abb. 5: Wasserspeichervariationen berechnet mit dem regionalen Modellansatz des DGFI (grün), den Modellwerten von NCEP/NCAR und den Abflusswerten des GRDC (blau) sowie des RL04 Gravitationsfeldmodells des GFZ (rot).

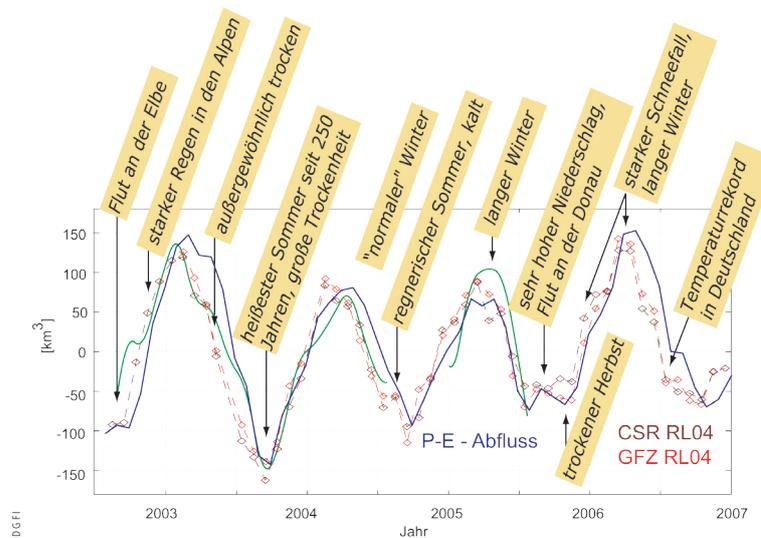


Abb. 6: Wasserspeichervariationen des DGFI (grün), des NCEP/NCAR/GRDC (blau), des GFZ (rot) und des CSR (braun) sowie extreme Wetterereignisse in Mitteleuropa seit 2002.

tere Hintergrundmodelle für die Atmosphäre und den Ozean genutzt werden mussten, als es im aktuellen RL04 Modell möglich war.

Abbildung 6 zeigt die gleiche Zeitreihe, verlängert bis Ende 2007, und weist auf besondere Wetterereignisse während dieser Zeit im Untersuchungsgebiet hin. Insbesondere ist der schon erwähnte trockene heiße Sommer 2003 deutlich erkennbar, aber auch der extrem schneereiche Winter 2005/2006 oder das Donauhochwasser im August 2005.

Ausblick

Es lässt sich feststellen, dass aus den Beobachtungen der Satellitenmission GRACE hydrologische Massenvariationen eindeutig detektiert werden können. Da zu erwarten ist, dass künftig noch präzisere Hintergrundmodelle für die übrigen Erdsystemkomponenten vorliegen werden, lassen sich dann auch deutlich verbesserte Modelle

für die kontinentale Hydrologie entwickeln. Neben der GRACE-Mission werden in naher Zukunft auch noch eine Vielzahl weiterer Satellitenmissionen dazu beitragen, dass die Vorgänge in und zwischen den Wasserspeicherkomponenten erkannt und modellierbar werden.



Michael Schmidt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts (DGFI). Florian Seitz war ebenfalls am DGFI tätig und hat seit dem 1.10.2007 die Juniorprofessur für Earth Oriented Space Science and Technology (ESPACE) an der Technischen Universität München inne. Das DGFI führt die Forschungsaufgaben der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften aus.