

Gravitationsbasierte Wasserdetektion am Beispiel des Euphrat-Tigris Wasserbassins

Michael Kenn

15. September 2011

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird einleitend die mathematische Modellierung des Erdgravitationsfeldes mittels Kugelflächenfunktionen als gestörtes sphärisches Potential beschrieben. Der hydrostatische Kreislauf sowie Langzeittrends im Wasservorkommen bewirken zeitliche Veränderungen in diesem Potential. Durch kontinuierliche Satellitenmessungen dieser Fluktuationen kann so der Wasserhaushalt großer Wasserbassins beschrieben werden. Ein wichtiges Einzugsgebiet ist die Region um die Flüsse Euphrat und Tigris. Das Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) liefert für dieses Gebiet Daten für das Studium des jährlichen Wasserflusses sowie von Langzeittrends.

1 Einleitung

Der umfangreiche Einsatz weltraumbasierter Technologien hat in den letzten Jahren zu einer immer genaueren Beschreibung der physikalischen Gegebenheiten unseres Planeten geführt. Meteorologische Satelliten im geostationären Orbit (GEO) in 36.000 Kilometer Höhe helfen schon seit mehreren Jahrzehnten großräumig Wetterphänomene zu verstehen und vorherzusagen. In den letzten 15 Jahren hat der Aufschwung von erdnahen Satelliten in low earth orbits (LEO) in 500-700 Kilometer Höhe zu einer immer genaueren Vermessung des Erdgravitationsfeldes sowie des Erdmagnetfeldes geführt. Das Geopotential Model 96 (EGM96)[6] lieferte bereits 1996 eine detaillierte Beschreibung des Erdpotentialfeldes. Seit kurzem (2009) liefert der Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE) [5] der European Space Agency (ESA) Daten für Modelle von stetig wachsender Ordnung.

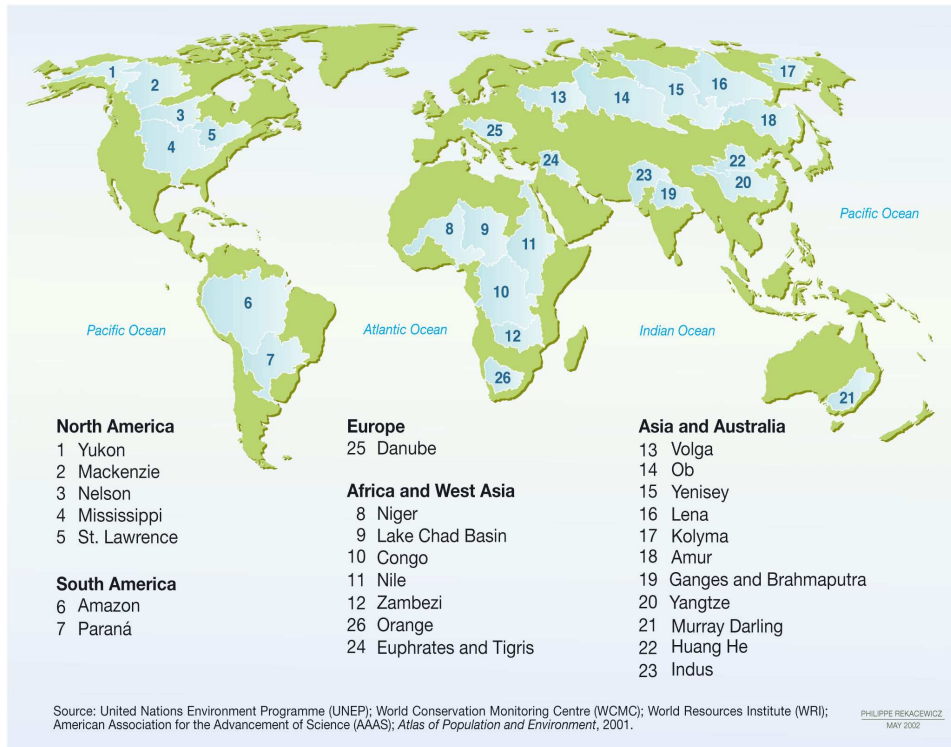


Abbildung 1: Die großen Wasserbassins der Erde

Bereits seit 2002 im Einsatz ist das Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [3], welches das Ziel verfolgt, Grundwasser- und Regenwasserverschiebungen in den großen Wasserreservoirs unseres Planeten zu erkennen. Dabei werden die zeitlichen Variabilitäten des Erdgravitationsfeldes vermessen, die in direkter Korrelation mit den Verschiebungen des Wasservorkommens stehen. Die so erhaltenen Daten zeigen nicht nur die jährlichen Wasserverschiebungen aufgrund des hydrostatischen Kreislaufs, sondern auch Langzeittrends. Besonders alarmierend ist dabei der Abfluss von Grundwasser im Nahen Osten sowie Zentralasien, worauf im Laufe dieser Arbeit eingegangen wird.

2 Modellierung des Erdgravitationsfeldes

Die Modellierung eines leicht gestörten sphärischen Potentials geschieht mittels Kugelflächenfunktionen. Der Winkelanteil des Laplace-Operators Δ in sphärischen Koordinaten ist

$$\Delta_{\vartheta, \varphi} = \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^2} + \frac{\cos \vartheta}{\sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$$

Unter den Kugelflächenfunktionen versteht man die Menge der paarweise zueinander orthogonalen Eigenfunktionen $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ mit

$$\Delta_{\vartheta, \varphi} Y_{lm}(\vartheta, \varphi) + l(l+1)Y_{lm}(\vartheta, \varphi) = 0, \quad 0 \leq m \leq l$$

Die Orthogonalitätsbeziehung ist dabei

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi Y_{lm}(\vartheta, \varphi) \bar{Y}_{l'm'}(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = \delta_{ll'} \delta_{mm'}$$

Die Funktionen $Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$ sind durchwegs elementar darstellbar

$$Y_{lm} : [0, \pi] \times [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{C}, \quad (\vartheta, \varphi) \mapsto \tilde{P}_{lm}(\cos \vartheta) e^{im\varphi},$$

wobei die \tilde{P}_{lm} normierte zugeordneten Legendrepolynome sind. Die Konstruktion dieser Polynome ist einfach und kann zum Beispiel bei [7] nachgelesen werden. Der Übersichtlichkeit halber empfiehlt sich eine Trennung in einen Cosinus- und einen Sinusanteil

$$\begin{aligned} Y_{lm}^{(C)}(\vartheta, \varphi) &= \Re Y_{lm}(\vartheta, \varphi) = \tilde{P}_{lm}(\cos \vartheta) \cos(m\varphi) \\ Y_{lm}^{(S)}(\vartheta, \varphi) &= \Im Y_{lm}(\vartheta, \varphi) = \tilde{P}_{lm}(\cos \vartheta) \sin(m\varphi) \end{aligned}$$

Mit diesen Ausdrücken kann die Störung des äußeren¹ Potentials des Erdgravitationsfeld angeschrieben werden als

$$V(r, \vartheta, \varphi) = \frac{GM}{R} \sum_{l=2}^L \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=0}^l \left(C_{lm} Y_{lm}^{(C)}(\vartheta, \varphi) + S_{lm} Y_{lm}^{(S)}(\vartheta, \varphi) \right)$$

G , M , und R sind dabei naturgemäß die Gravitationskonstante, die Masse der Erde und die große Halbachse des Erdellipsoids. Die Dimension von $V(r, \vartheta, \varphi)$ ist die einer spezifischen Energie. Die Koeffizienten C_{lm} und S_{lm} müssen noch geeignet gewählt werden.

¹Das Potential im Inneren der Erdkugel folgt einer ähnlichen Formel, ist aber in diesem Zusammenhang unerheblich.

3 GOCE

Beim Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE)[5] handelt es sich um ein Satellitenprogramm der ESA. Ein Hauptanwendungsgebiet ist die möglichst genaue Modellierung des Erdgravitationsfeldes. Ein im Februar 2011 erstelltes Modell der Ordnung $L = 360$ nimmt dabei für die Erde folgende Parameter an:

$$\begin{aligned} R &= 6.3781363 \cdot 10^6 \text{ m} \\ GM/R &= 6.2494814 \cdot 10^7 \text{ m}^2/\text{s}^2 \end{aligned}$$

Der Koeffizient $C_{20} \approx -0.484 \cdot 10^{-3}$ modelliert im Wesentlichen die Oblatness der Erde. Alle weiteren Koeffizienten sind im Vergleich dazu um einige Zehnerpotenzen kleiner. Der durchschnittliche Erwartungswert für die relative Störung im Potential des Erdgravitationsfeldes beträgt über die gesamte Erde betrachtet nach Abzug der polaren Abplattung weniger als 10^{-6} . Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die um den Faktor 50000 vergrößerte Störung im Erdgravitationspotential nach Korrektur der polaren Abplattung.

Die Methodik zur Berechnung der Koeffizienten C_{lm} und S_{lm} ist nicht ganz einfach und wird in [9] ausgeführt. Am einfachsten ist dabei die Zero-order Tikhonov (ZOT) Regularisierung. Hier bezeichnet \mathbf{V}_{obs} den Vektor der vom Satelliten bestimmten Werte an den Stützstellen und $\hat{\mathbf{V}}$ eine Approximation mit einem Set Koeffizienten. Der rechte Term dient zur Regularisierung und gewährleistet bei geeignetem λ die notwendige Robustheit des numerischen Lösungsverfahrens.

$$\|\mathbf{V}_{\text{obs}} - \hat{\mathbf{V}}\|^2 + \lambda \|\hat{\mathbf{V}}\|^2 \rightarrow \min$$

Es lässt sich zeigen, dass

$$\|\hat{\mathbf{V}}\|^2 \propto (GM)^2 \sum_{l=2}^L \sum_{m=0}^l (C_{lm}^2 + S_{lm}^2),$$

was in etwa der Bedingung entspricht, die Koeffizienten im Schnitt möglichst klein zu halten. In der Praxis geht man jedoch üblicherweise zu Tikhonov Regularisierungen höherer Ordnung über. Bei einer Regularisierung erster Ordnung ersetzt man im Regularisierungsterm den Schätzvektor $\hat{\mathbf{V}}$ durch den horizontalen Oberflächengradienten $\nabla_H \hat{\mathbf{V}}$, bei einer Regularisierung zweiter Ordnung entsprechend durch den Oberflächenlaplaceoperator $\Delta_H \hat{\mathbf{V}}$.

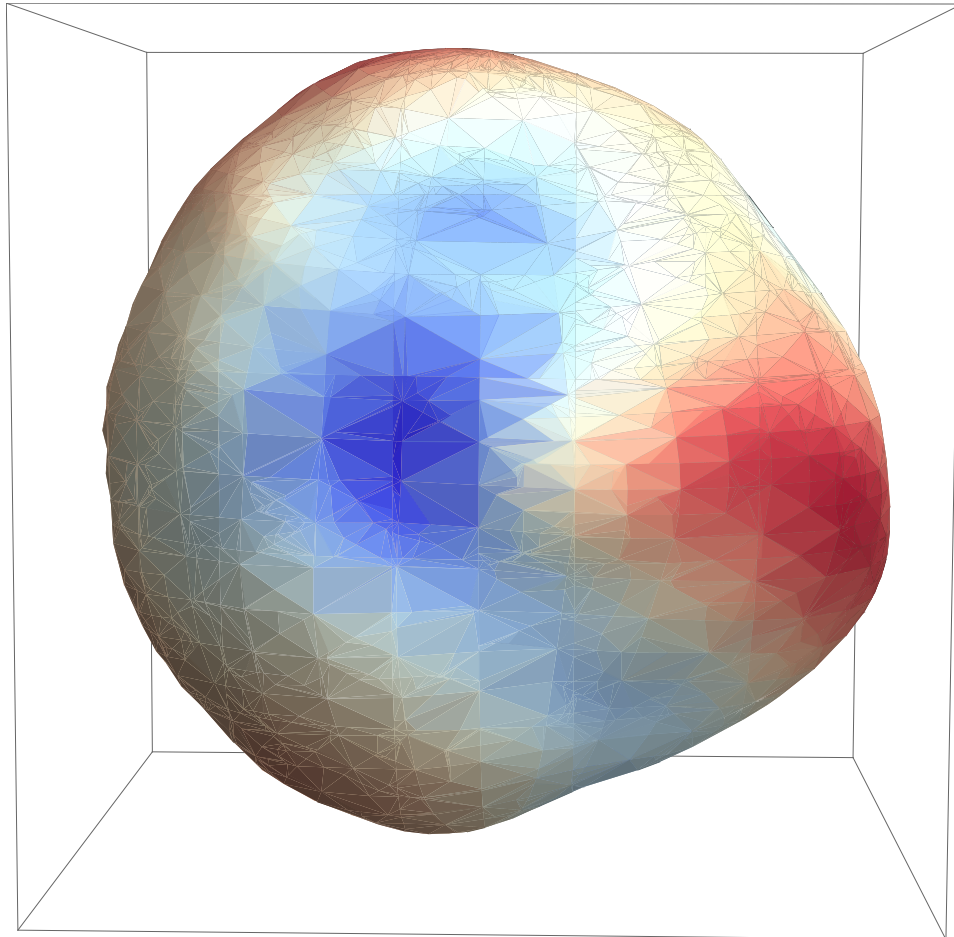


Abbildung 2: Bildliche Darstellung der Störungen im Erdgravitationsfeld. Das Phänomen der Abplattung der Pole ist bereits herausgerechnet und abgezogen. Die Erdkugel ist so ausgerichtet, dass der Punkt mit geographischer Länge $90^\circ E$ vorne liegt (vergleiche Abbildung 3). Da die Fluktuationen im Gravitationsfeld sehr klein sind wurden der Anschaulichkeit halber die Werte mit dem Faktor 50000 skaliert.

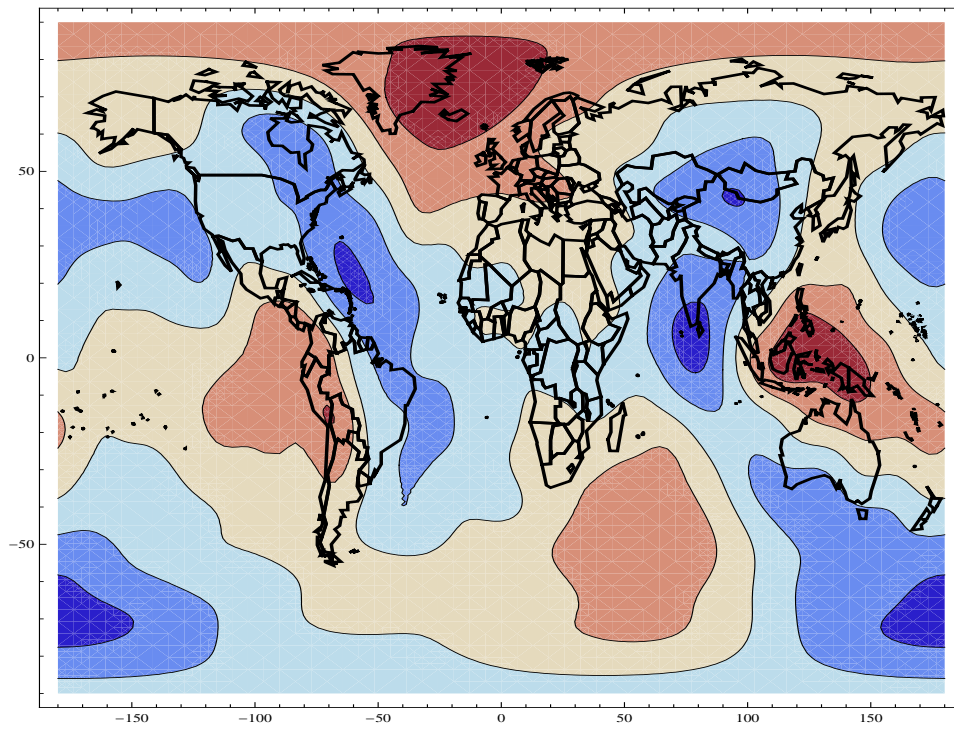


Abbildung 3: Störung im Erdgravitationsfeld. Rote Bereiche zeigen eine leicht erhöhte Gravitation. Die relativen Störungen sind in einer Größenordnung von maximal 10^{-6} .

4 GRACE

Das Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)[3] vermisst seit März 2002 die zeitlichen Veränderungen des Erdgravitationsfeldes. Dabei handelt es sich um zwei Satelliten, die in einem Abstand von wenigen hundert Metern etwa alle 90-100 Minuten einmal die Erde umkreisen. Nähert sich der erste Satellit einer Gegend mit höherer Gravitation, so wird er beschleunigt und der Abstand der beiden Sonden vergrößert sich. Mit dieser Technik können Störungen im Gravitationsfeld quantitativ erfasst werden. Über 9 Jahre lang hat das GRACE Satellitensystem die gravitativen Veränderungen unserer Erde aufgezeichnet. Diese zeitlichen Fluktuationen stehen im direkten Zusammenhang mit den Verschiebungen des Wasservorkommens.

Die Erkenntnisse über den globalen Wasserfluss liefern die Möglichkeit, den jährlichen hydrostatischen Kreislauf auf unserem Planeten zu verstehen. Wesentlich wichtiger ist jedoch die Beobachtbarkeit von Langzeittrends. Während Regenwasser, Gewässer und Flüsse nur einen kleinen Teil der Bewegungen ausmachen, ist in vielen Regionen eine dramatische Abnahme des Grundwasservorkommens zu beobachten. Beispielsweise ist im gesamten Nahen Osten in der Zeit zwischen 2003 und 2009 eine Abnahme des Nutzwasservorrats von 143 km^3 zu verzeichnen [10], was einen nicht unerheblichen Anteil des gesamten Wasservorkommens der Region ausmacht (vergleiche Tabelle 1).

Die GRACE Daten sind aufgrund der ESA Policy frei verfügbar [4]. Ein Set von Überland-Daten² kann unter [2] abgerufen werden. Die räumliche Auflösung der Daten beträgt zwar nur jeweils 1° in geographischer Länge und Breite, ist aber ausreichend, um Modelle zum globalen Wasserfluss zu erstellen.

Im Rahmen des Space Studies Program 2011 (SSP11) der International Space University (ISU) wurde ein Team-Projekt zum Thema Fresh-Water ins Leben gerufen. 39 Studenten aus 30 Ländern beschäftigten sich neun Wochen lang unter anderem mit der Interpretation dieser Daten. Nach demokratischem Beschluss wurde die Region um Euphrat und Tigris [8] für eine case-study ausgewählt. Ziel war es, einen Empfehlungskatalog bezüglich Wassermanagements für Entscheidungsträger der betroffenen Länder zu erstellen.

²GLDAS Land Water Content (monthly)

Staat	Nutzwasservorkommen
Ägypten	85.8 km ³
Irak	96.6 km ³
Iran	137.5 km ³
Jordanien	1.6 km ³
Saudi Arabien	2.4 km ³
Syrien	55.8 km ³
Türkei	231.7 km ³
Österreich	77.7 km ³

Tabelle 1: Jährlich verfügbares, erneuerbares Nutzwasservolumen für einige ausgewählte Staaten nach FAO/Aquastat.

5 Die Region um Euphrat und Tigris

Die erweiterte Region um Euphrat und Tigris erstreckt sich zwischen 35° E und 59° E beziehungsweise 27° N und 43° N und ist damit über 3 Millionen km² groß. Die wichtigsten Länder sind dabei Irak, Syrien und die Türkei, die jeweils überproportionale Ansprüche für die Nutzung der beiden Flüsse stellen. Werte bezüglich jährlich verfügbaren Nutzwassers für die gesamte Region liefert die Food and Agriculture Organisation (FAO) der Vereinten Nationen mittels AQUASTAT [1]. Einige Staaten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Wie bereits früher erwähnt beträgt der Abfluss an Nutzwasser für den gesamten Nahen Osten in der Zeit zwischen 2003 und 2009 alarmierende 143 km³. Es folgt eine kurze Zusammenfassung der jährlichen periodischen Fluktuationen sowie der Langzeittrends für das Euphrat-Tigris Becken.

Jährliche Periodizitäten :

Um die jährlichen Fluktuationen zu erkennen, müssen Langzeittrends sowie äußere Einflüsse wie Gezeiten korrigiert werden. Abbildung 4 zeigt das relative Wasservorkommen für die Monate Jänner, April, Juli und Oktober. Je dunkler die Fläche ist, desto mehr Wasser wird beobachtet. Es ist bemerkenswert, dass die grossen jährlichen Fluktuationen nicht im Wasserbassin selbst sondern im angrenzenden Iranischen Zagros-Gebirge sowie im Hochland von Anatolien rund um den Van-See stattfinden. Abbildung 5 zeigt den jährlichen Wasserfluss zwischen dem Bergland und dem Flussbett von Euphrat und Tigris über zehn Jahre.

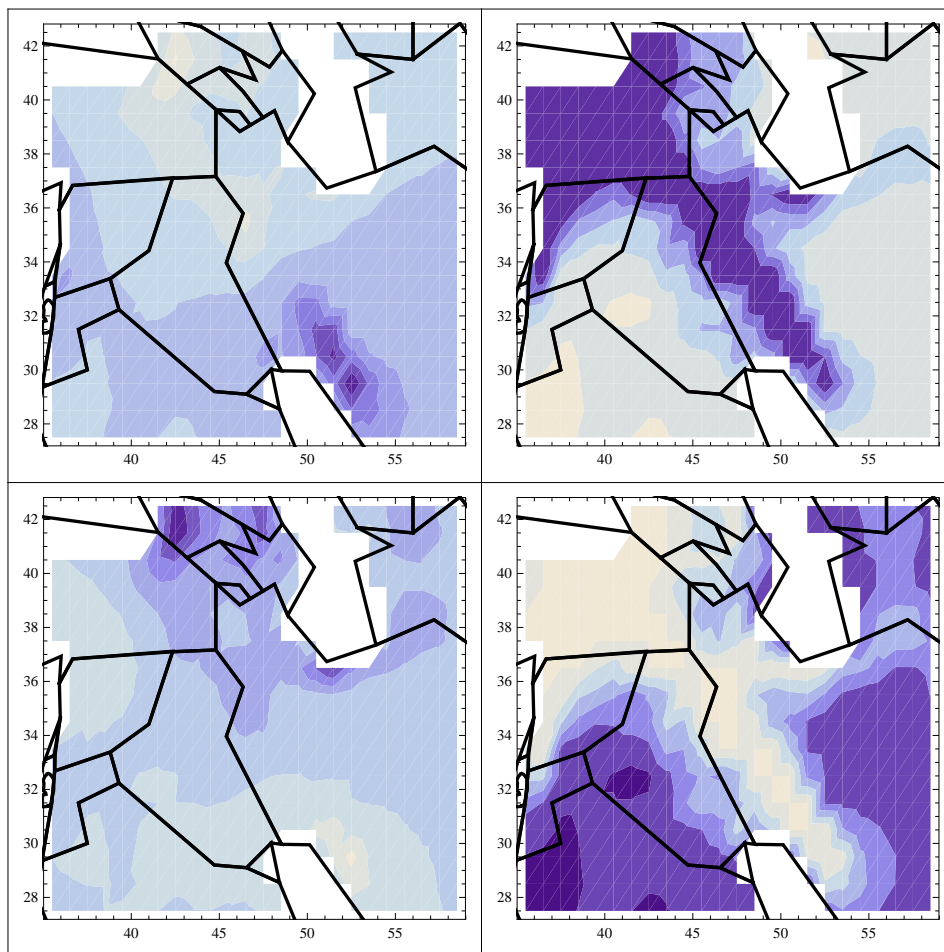


Abbildung 4: Die jährlichen Wasserfluktuationen in der Region um Euphrat und Tigris. Dunkle Flächen deuten auf ein vermehrtes Wasservorkommen hin. Die 4 Abbildungen sind gemittelte Werte für die Monate Jänner, April, Juli und Oktober.

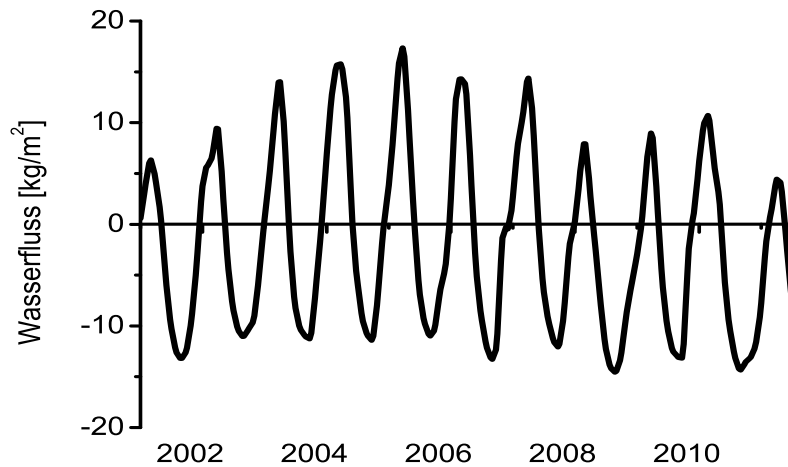


Abbildung 5: Die gemittelte jährliche Wasserfluktuation im Euphrat-Tigris Becken über 10 Jahre.

Langzeittrend :

Für Langzeitstudien des Wasserhaushalts eines Wasserbassins werden die jährlichen Fluktuationen herausgerechnet. Das ist für die Region um Euphrat und Tigris insofern etwas problematisch, da erst seit etwas mehr als zehn Jahren flächendeckend Messwerte zur Verfügung stehen. Des weiteren beschränken sich die Messwerte³ ausschließlich auf die Remote Sensing Daten der GRACE Mission. Bodenbasierte Untersuchungen könnten helfen, die Genauigkeit der Befunde zu verbessern.

Die gefundenen Trends sind dennoch überzeugend. Das Wasservorkommen ist am Anfang dieses Jahrhunderts noch leicht gestiegen, aber spätestens seit 2005 ist eine dramatische Abnahme zu verzeichnen. Abbildung 6 zeigt die Entwicklung des Gesamtnutzwasservorrats der Region um Euphrat und Tigris und bestätigt den bereits früher erwähnten Abfluss von 143 km^3 in den letzten Jahren [10].

³zumindest für die hier präsentierte Auswertung



Abbildung 6: Der Langzeittrend im Euphrat-Tigris Becken. Seit 2005 ist eine signifikante Abnahme des Wasserstandes zu erkennen.

6 Zusammenfassung

Satellitengestützte Missionen zeigen neben jährlichen, natürlichen Fluktuationen große Verschiebungen im Wasservorkommen in den großen Wasserbecken unserer Erde. Ein gutes Beispiel dafür ist die Region um Euphrat und Tigris, wo durch exzessive Nutzung der Anrainerstaaten der Gesamtwasservorrat in den letzten Jahren alarmierend gesunken ist. Es ist wichtig, Bewußtsein für diese Problematik zu schaffen und internationale Lösungswege für diese Wasserkrise anzuregen. Weltraumunterstützte Technologien spielen bei der langfristigen Planung eine große Rolle. Der heute notwendige finanzielle Einsatz dafür ist mit Sicherheit um einiges geringer, als der mögliche Schaden später.

Auf meiner Homepage <http://www.kenn.at> befinden sich unter Fresh-Water einige Artikel, Unterlagen, Animationen und Präsentationen die im Rahmen des SSP11 der ISU im Sommer 2011 entstanden sind. Diese Auswahl soll laufend erweitert werden. Ich lade interessierte Personen ein den Verfasser dieser Ausarbeitung dabei zu unterstützen.

Literatur

- [1] Aquastat. www.fao.org/nr/water/aquastat/water_res/index.stm.
- [2] GRACE - GLDAS Land Water Content (monthly). <http://grace.jpl.nasa.gov/data/gldas/>.
- [3] GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment. <http://www.csr.utexas.edu/grace/>.
- [4] GRACE - Tellus. <http://grace.jpl.nasa.gov/>.
- [5] Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer. <http://www.esa.int/SPECIALS/GOCE/index.html>.
- [6] The NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model. <http://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html>.
- [7] Wolfram MathWorld. <http://mathworld.wolfram.com>.
- [8] A. Akanda, S. Freeman, and M. Placht. The Tigris-Euphrates River Basin: Mediating a Path Towards Regional Water Stability. *al Nakhlah*, 2007.
- [9] P. Ditmar, J. Kusche, and R. Klees. Computation of spherical harmonic coefficients from gravity gradiometry data to be acquired by the goce satellite:regularization issues. *Physical, Geometrical and Space Geodesy (FMR), Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Thijsseweg 11, 2629 JA Delft, The Netherlands*, 1 July 2003. www.springerlink.com/content/nb4fpagn0785aha3/fulltext.pdf.
- [10] K. Voss, J. S. Famiglietti, M. Lo, C. de Linage, S. C. Swenson, and M. Rodell. Water Availability in the Tigris-Euphrates River Basin and the Middle East from GRACE. *AGU Fall Meeting Abstracts*, pages I926+, Dec. 2010. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFM.H11I0926V>.