

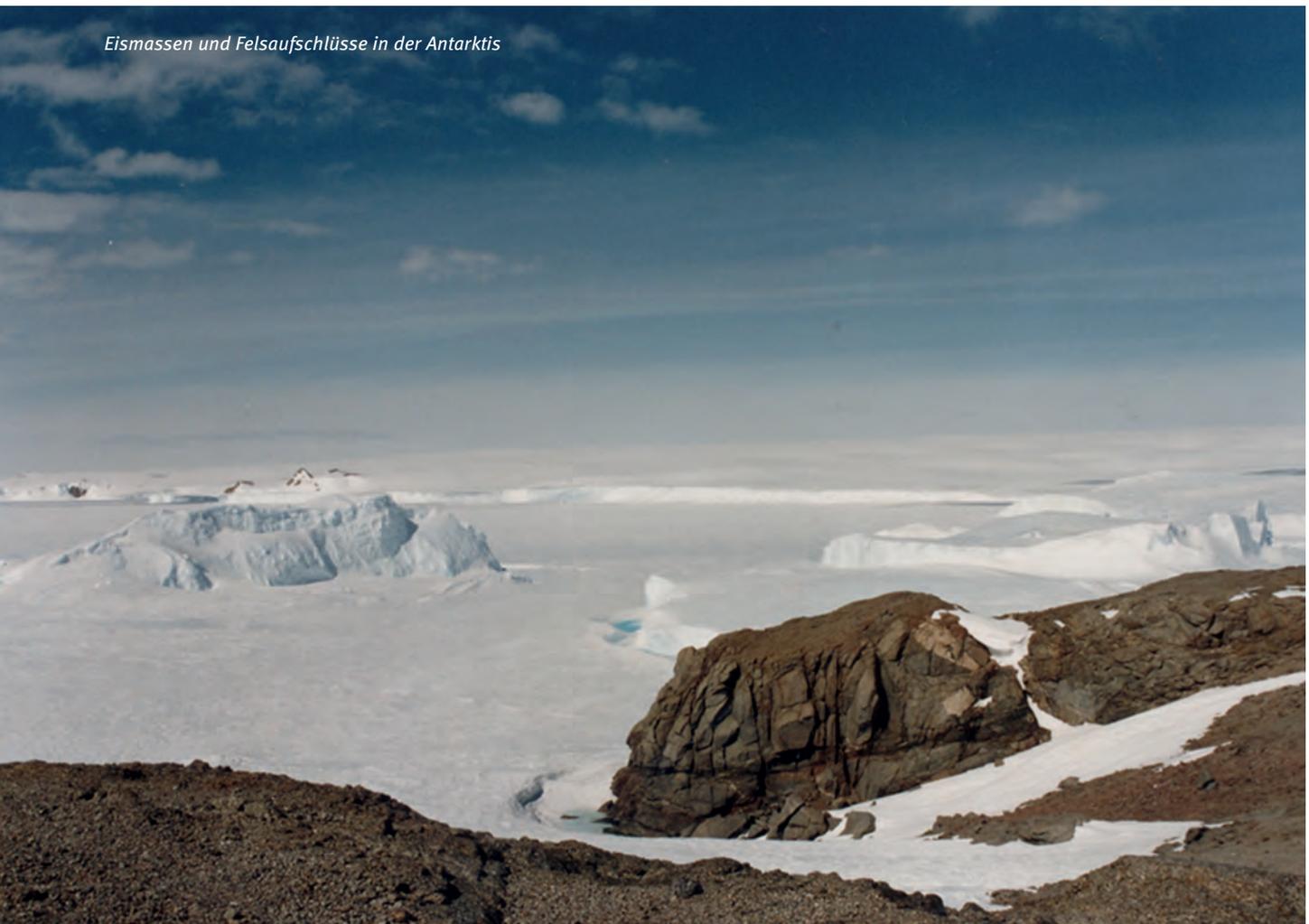
# El Niño und La Niña: GRACE misst Gegensätze im westantarktischen Schneefall

Ingo Sasgen<sup>1</sup>, Henryk Dobslaw<sup>1</sup>, Zdeněk Martinec<sup>2</sup>, Maik Thomas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, <sup>2</sup>GFZ, jetzt Dublin Institute for Advanced Studies Geophysics Section, Irland

*Two regions in West Antarctica have received increased attention over the last years due to their potential sensitivity to climate change: the Antarctic Peninsula, which currently experiences warming at rates greater than the global average (Vaughan, 2006), ongoing ice shelf disintegration and subsequent glacier acceleration (Scambos et al., 2004); and the Amundsen Sea Sector (AS), where ice velocities, ice discharge and glacial imbalances are extreme compared to the rest of the continent (Rignot et al., 2008). The satellite gravimetry mission GRACE reveals interannual variations in ice mass related to varying snowfall, which is strongly influenced by the global climate phenomenon El Nino (Sasgen et al., 2010).*

Eismassen und Felsaufschlüsse in der Antarktis



## Schlüsselregionen für die antarktische Eismassenbilanz

Zwei Regionen in der Antarktis sind wegen ihrer Sensitivität gegenüber globalen Klimaveränderungen von besonderem wissenschaftlichen Interesse: die Antarktische Halbinsel, wo gegenwärtig eine den globalen Mittelwert überschreitende Erwärmung (Vaughan, 2006) und das Kollabieren großer Schelfeisgebiete zu beobachten sind (Rignot et al., 2008), sowie das Amundsen-Gebiet der West-Antarktis, in dem derzeit die größten Fließgeschwindigkeiten und Massenverluste des Antarktischen Eisschildes gemessen werden. Die Eismächtigkeit einiger Gletscher verringert sich hier rapide und die Aufsetzlinie der Gletscher und Eisströme weicht deutlich ins Landesinnere zurück.

Die Satellitenmission GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) liefert mit ihren hochgenauen monatlichen Schwerfelddaten eine neuartige Basis zur Erfassung von Massentransporten im System Erde (vgl. den Beitrag von Flechtner und Förste in diesem Heft). Für die polaren Eisschilde wurden aus der GRACE-Zeitreihe mehrjährige Trends, deren Beschleunigung und die saisonalen Variationen der Eismasse abgeleitet.

Analysen des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ zeigen, dass die Antarktische Halbinsel und das Amundsen-Gebiet zwischen den Jahren 2002 und 2010 im Mittel mit 0,3 mm pro Jahr zum mittleren globalen Meeresspiegelanstieg von etwa 3 mm pro Jahr beitragen. Höhere Genauigkeiten der GRACE-Schwerfelder, optimierte Auswertungsverfahren und ein längerer Beobachtungszeitraum ermöglichen es nun zusätzlich, die mehrjährige Variation der Eismasse auf regionaler Skala zu erfassen und einen Zusammenhang dieser Veränderungen mit dem globalen Klimasystem herzustellen (Sasgen et al., 2010).

Da der antarktische Kontinent vollständig von Ozeanen umgeben ist, können sich Luftmassen ungehindert von Norden in Richtung des Eisschildes bewegen. Atmosphärische Zustände der tropischen Breiten, wie sie z. B. im Zusammenhang mit der El Niño Southern Oscillation (ENSO) stehen, können daher leicht in höhere Breiten transportiert werden und nehmen dort Einfluss auf den Luftdruck sowie den Feuchtigkeitstransport in und um die Antarktis (Turner, 2004). ENSO ist eine etwa alle fünf Jahre wiederkehrende klimatische Variation in Atmosphäre und Ozean im Bereich des tropischen Pazifik. Die Periodenphase der atmosphärischen ENSO-Komponente wird häufig durch den Southern Oscillation Index (SOI) beschrieben, der

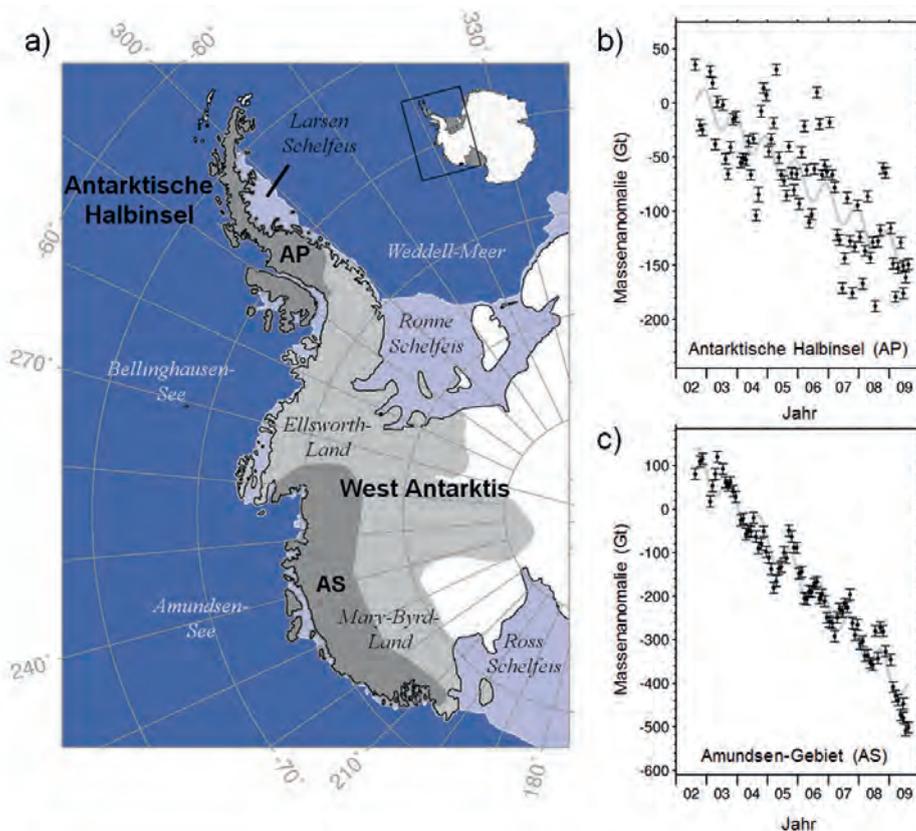


Abb. 1: a) Untersuchungsgebiet und Massenänderungen aus GRACE-Schwerfeldern entlang der b) Antarktischen Halbinsel (AP, dunkel schattiert) und im c) Amundsen-Gebiet (AS, dunkel schattiert)

Fig. 1: a) Region of investigation and mass change estimates from GRACE gravity fields along the b) Antarctic Peninsula (AP, dark grey) and in the c) Amundsen Sea Sector (AS, dark grey)



Kontakt: I. Sasgen  
(sasgen@gfz-potsdam.de)

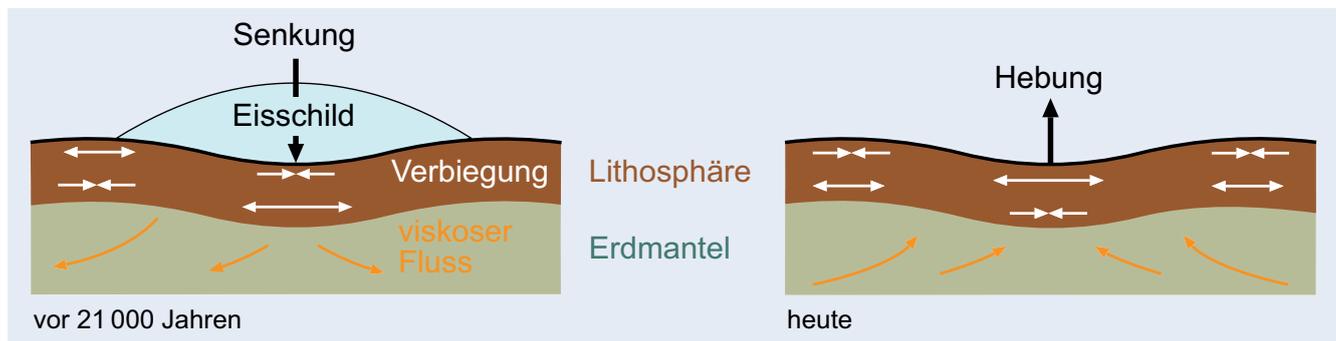


Abb. 2: Durch das Abschmelzen großer Eismassen nach der letzten Eiszeit hebt sich die Lithosphäre. Das zähflüssige Mantelmaterial fließt verzögert nach. GRACE misst einen Massezuwachs in diesen Gebieten.

Fig. 2: The retreat of the large ice sheets after the Last-Glacial Maximum caused uplift of the lithosphere. Viscous mantle material flows back into the regional of former glacial loads. GRACE detects this delayed response as an increase in mass.

aus der Differenz im Luftdruck zwischen der süd pazifischen Insel Tahiti, Französisch-Polynesien (131° E, 13° S) und dem Küstenort Darwin, Australien (210° E, 18° S) berechnet wird (Parker, 1983).

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ belegen erstmals einen Zusammenhang zwischen ENSO und Variationen im Nettoniederschlag der Antarktis auf der Basis von GRACE-Schwerefeldern. Als Grundlage dienen 80 GRACE-Schwerefelder des GFZ (GFZ RL04), die den Zeitraum August 2002 bis August 2009 überdecken. Sie sind im Information Systems and Data Center ISDC öffentlich zugänglich (<http://isdc.gfz-potsdam.de>). Die Untersuchung wurde dabei auf die Antarktische Halbinsel mit 198 000 km<sup>2</sup> und das Amundsen-Gebiet mit 432 000 km<sup>2</sup> fokussiert (Abb. 1a, dunkel schraffierte Flächen). Beide Regionen zusammen erhalten etwa 20 % des Nettoniederschlags der gesamten Antarktis (> 400 mm pro Jahr zwischen 1958 und 2001) und sind daher wichtig für die kontinentale Eismassenbilanz.

Abbildung 1 zeigt die aus GRACE abgeleiteten Massenanomalien entlang der Antarktischen Halbinsel und im Amundsen-Gebiet zwischen August 2002 und August 2009. Da GRACE die Gesamtmasse misst, müssen Massenflüsse im Erdinnern, die durch Änderung der Eisauflast seit der letzten Eiszeit entstehen, korrigiert, d. h. ausgeglichen werden (Abb. 2).

Nach dieser glazial-isostatischen Korrektur ergeben sich Raten des Eismassenverlusts von  $-29 \pm 3$  Gigatonnen (Gt) pro Jahr für die Antarktische Halbinsel und  $-81 \pm 6$  Gt pro Jahr für das Amundsen-Gebiet. Dies entspricht einem äquivalenten Meeresspiegelanstieg von zusammen etwa 0,3 mm pro Jahr, also etwa einem Zehntel des derzeit beobachteten jährlichen Meeresspiegelanstiegs im globalen Mittel.

Es ist bekannt, dass während einer ENSO-Warmphase (also negativem SOI) – ein sogenanntes El Niño-Jahr – Verände-

rungen im Split-Jetstream der oberen Atmosphäre über dem Südpazifik auftreten, die mit einer Stärkung des subtropischen Strahlstroms und einer Schwächung des Polarfront-Jets einhergehen. Während ENSO-Kaltphasen (bei positivem SOI) – sogenannte La Niña-Jahre – sind die Verhältnisse tendenziell umgekehrt, was sich in einer Stärkung des Polarfront-Jets und des Tiefdruckgebiets über der Amundsen-See äußert. Dieses Tiefdruckgebiet hat dabei einen wichtigen Einfluss auf den Feuchtigkeitstransport entlang der westantarktischen Küste. Korrelationen zwischen dem SOI und der Stärke des Tiefdruckgebiets sowie mit den damit verbundenen Variationen im Feuchtigkeitstransport werden sowohl in Daten meteorologischer Modelle des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) als auch in In-situ-Beobachtungen gefunden (Turner, 2004).

### ENSO-Signaturen in Luftdruck und Feuchtigkeitstransport

Um für das ENSO-Phänomen typische Abweichungen von der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation zu beschreiben, wurden Anomalien der 500-hPa-Geopotentialhöhe, des vertikal integrierten Feuchtigkeitstransports und der Niederschlagsmengen berechnet, und zwar über den Zeitraum eines Jahrs nach dem Auftreten eines lokalen Extremwerts des SOI. Die zugrunde liegende Annahme ist, dass atmosphärische ENSO-Bedingungen am ausgeprägtesten nach einem Extremwert im SOI in hohen südlichen Breiten auftreten. Insgesamt wurden die Anomalien aus 36 Monaten im Anschluss an starke ENSO-Warmphasen und ENSO-Kaltphasen durch Abzug des Mittelwerts der Jahre 2002 bis 2009 berechnet.

Abbildung 3a zeigt, dass über der Amundsen-See im Anschluss an extreme ENSO-Kaltphasen (lokales Maximum des SOI) ein starkes Tiefdruckgebiet auftritt. Geostrophisch, d. h. entspre-

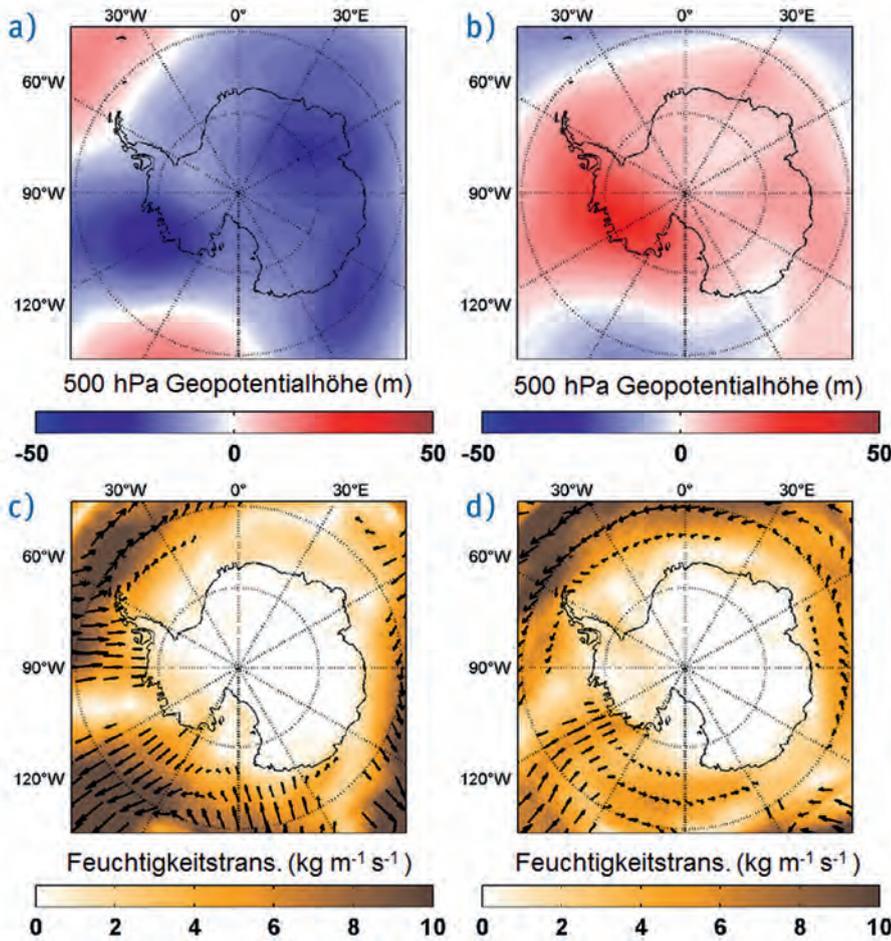


Abb. 3: Zustand der Atmosphäre im Zusammenhang mit ENSO während der Jahre 2002 und 2009 aus ECMWF-Daten

ENSO-Kaltphase:  
a) 500 hPa Druckanomalie und  
c) Feuchtigkeitstransportanomalie

ENSO-Warmphase:  
b) 500 hPa Druckanomalie  
d) Feuchtigkeitstransportanomalie

Fig. 3: Atmospheric conditions related to ENSO for the years 2002 to 2009 from ECMWF data

ENSO cold conditions:  
a) 500 hPa pressure anomaly  
c) moisture transport

ENSO warm conditions:  
b) 500 hPa pressure anomaly  
d) moisture transport anomaly

chend des Druckgradienten und der Coriolis-Kraft, strömender Wind umfließt das Tiefdruckgebiet um Uhrzeigersinn und trägt die feuchte Luft in Richtung auf die Antarktische Halbinsel, während im Amundsen-Gebiet trockene Winde aus dem Innern des Kontinents dominieren (Abb. 3c). Die besonders starke Ausprägung des Tiefdruckgebiets in der Amundsen-See reduziert damit die Niederschlagsraten im Amundsen-Gebiet, verursacht aber eine allmähliche Zunahme der Niederschläge auf der Halbinsel.

Genau gegensätzlich ist die Situation nach warmen ENSO-Maxima. In den Monaten nach warmen ENSO-Bedingungen (lokale Minima des SOI) wird das Tiefdruckgebiet geschwächt und entgegengesetzte Strömungsmuster bilden sich aus (Abb. 3b und 3d). Der Feuchtigkeitstransport in Richtung des antarktischen Festlands nimmt zu, was die Niederschläge im Amundsen-Gebiet verstärkt und zeitgleich entlang der Halbinsel schwächt. Diese aus acht Jahren abgeleiteten anomalen atmosphärischen Strömungsmuster stimmen gut mit Ergebnissen aus Studien überein, die mit komplexen Analyseverfahren Zeitreihen von mehreren Jahrzehnten untersuchten (Fogt und Bromwich, 2006).

### Eismassenvariationen aus GRACE-Schwerefeldern

Um die modellierten Schwankungen des Feuchtigkeitstransports und damit des Niederschlags mit den aus GRACE-Schwerefeldern abgeleiteten Massenvariationen in Beziehung setzen zu können, muss zunächst die Nettoakkumulation berechnet werden. In erster Näherung wird dazu die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung zeitlich integriert, was mögliche Abtragprozesse durch Schmelzen oder lateralen Transport von Schnee vernachlässigt, wie sie in komplexen regionalen Klimamodellen berücksichtigt werden.

Abbildung 4 zeigt die interannuellen Eismassenvariationen aus GRACE-Schwerefeldern nach Subtraktion der jährlichen Schwankungen und einer Trendgerade. Durch einen Vergleich mit ECMWF-Daten wird deutlich, dass für die Jahre 2002 bis 2009 interannuelle Eismassenänderungen weitgehend durch interannuelle Variationen des Niederschlags und damit der Akkumulation erklärt werden können. Zudem zeigt sich, dass in den gefilterten GRACE-Massenvariationen die Antarktische Halbinsel und die Amundsen-See gegensätzlich korreliert sind, was durch die gegensätzlichen atmosphärischen Strömungsverhältnisse und Feuchtetransporte erklärt werden

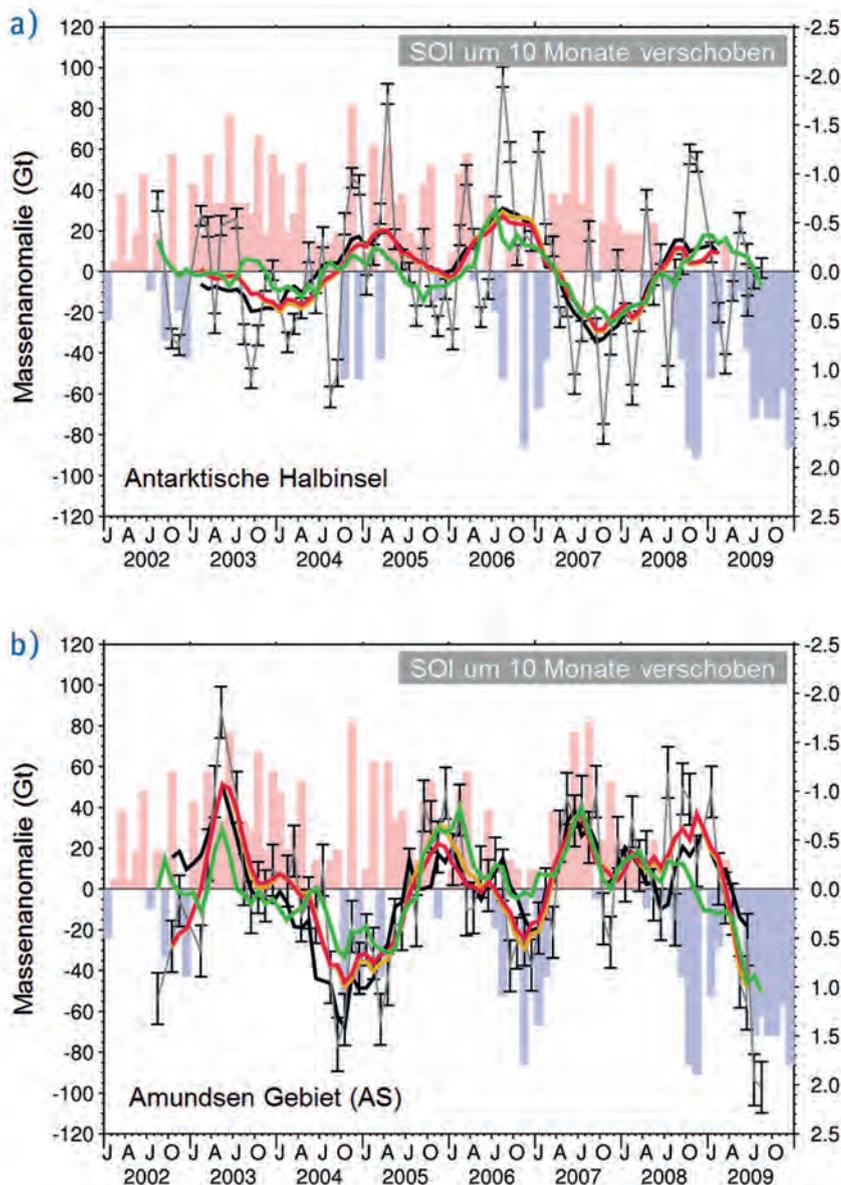


Abb. 4: Interannuelle Massenvariationen entlang a) der Antarktischen Halbinsel und b) im Amundsen-Gebiet während der Jahre 2002 bis 2009. Die Kurven entsprechen Schätzungen aus ECMWF-Daten (grün), GRACE-Schätzungen (ungefiltert mit Fehlerbalken, grau) und GRACE-Schätzungen nach Anwendung eines gleitenden Mittelungsfilters über elf (AP) bzw. fünf (AS) Monate. Die Zeitreihe des SOI ist um zehn Monate nach hinten verschoben und zeigt ENSO-Kaltphasen (blau) und ENSO-Warmphasen (rot).

Fig. 4: Interannual mass variations along a) the Antarctic Peninsula and b) in the Amundsen Sea Sector (AS) for the years 2002 to 2009. The curves are: ECMWF estimates (green), GRACE estimates unfiltered with uncertainties (grey); GRACE estimates filtered with a moving average filter of 11 (AP) and 5 (AS) months (red); The time series of the SOI is lagged by 10 months, and represents ENSO cold (blue) and ENSO warm (red) conditions.

kann. Im Vergleich zu den ECMWF-Daten, sind die Amplituden der GRACE-Signale um etwa 20 bis 40 % größer. Diese Unterschiede können ihre Ursache im verbleibenden Rauschen in den GRACE-Daten haben oder aber bedeuten, dass Akkumulationsvariationen in ECMWF-Daten unterschätzt werden.

## Ausblick

Die aus GRACE-Satellitendaten abgeleiteten Akkumulationsvariationen haben ihre Ursache in Variationen des Feuchtigkeits- transports, der wiederum über die Ausprägung des Tiefdruck- gebiets in der Amundsen-See eng mit dem globalen Klimaphä-

nomen El Niño/Southern Oscillation zusammenhängt. Einmal mehr wird dabei deutlich, dass der Antarktische Eisschild eine bedeutende Komponente des Klimasystems darstellt. Dabei sind die GRACE-Messungen momentan das einzige Verfahren, das Aufschluss über regionale Massenänderungen und damit Niederschlagsmengen dieser Region liefern kann. Für den Antarktischen Kontinent wird eine Zunahme des Niederschlags von etwa 6 bis 9% pro Grad Kelvin Temperaturerhöhung vorausgesagt (Lemke et al., 2007), was dem aktuellen Anstieg des Meeresspiegels aufgrund der damit einhergehenden Schneeakkumulation entgegenwirken würde. Die Zuverlässigkeit dieser Voraussagen auf der Basis von Klimamodellen lässt sich in Zukunft mit Hilfe der kontinuierlichen Messungen

von Schwerefeldsatelliten wie GRACE prüfen. Mit der GRACE-Follow-On-Mission (GRACE-FO) kann die dafür erforderliche Verlängerung der Messzeitreihen erreicht werden, so dass die Geowissenschaften einen zentralen Beitrag zum Verständnis von Klima und Klimawandel in der Antarktis-Region leisten.

## Literatur

- Fogt, R. L., Bromwich, D. H. (2006): Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high latitude South Pacific governed by coupling with the Southern Annular Mode. – *Journal of Climate*, 19, 6, 979-997, 10.1175/JCLI3671.1.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. H., Zhang, T. (2007): Observations: changes in snow, ice and frozen ground. - In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., Miller, H. L., Chen, Z. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis ; contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 337-383.
- Parker, D. E. (1983): Documentation of a southern oscillation index. – *The Meteorological magazine*, 112, 184-188.
- Rignot, E., Bamber, J. L., van den Broeke, M. R., Davis, C., Li, Y., van de Berg, W. J., van Meijgaard, E. (2008): Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. - *Nature Geoscience*, 1, 2, 106–110, 10.1038/ngeo102.
- Sasgen, I., Dobslaw, H., Martinec, Z., Thomas, M. (2010): Satellite gravimetry observation of Antarctic snow accumulation related to ENSO. - *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 3-4, 352-358, 10.1016/j.epsl.2010.09.015.
- Scambos, T. A., Bohlander, J. A., Shuman, C. A., Skvarca, P. (2004): Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. - *Geophysical Research Letters*, 31, L18402, 10.1029/2004GL020670.
- Turner, J. (2004): The El Niño–southern oscillation and Antarctica. – *International Journal of Climatology*, 24, 1, 1-31, 10.1002/joc.965.
- Vaughan, D. G. (2006): Recent trends in melting conditions on the Antarctic Peninsula and their implications for ice-sheet mass balance and sea level. - *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 38, 1, 147-152, 10.1657/1523-0430(2006)038[0147:RTIMCO]2.o.CO;2.